

The background of the cover is a vibrant cosmic scene. It features a large, glowing nebula with swirling patterns of orange, red, and green gas. Numerous stars of various colors (blue, white, yellow) are scattered throughout the dark space, some appearing as bright points and others as smaller, dimmer specks. The overall effect is a sense of vastness and the beauty of the universe.

DO BIG BANG AO UNIVERSO ETERNO

Mário Novello



Mário Novello

Do big bang ao Universo eterno

2ª edição



Copyright © 2010, Mário Novello

Copyright desta edição © 2010:

Jorge Zahar Editor Ltda.

rua México 31 sobreloja

20031-144 Rio de Janeiro, RJ

tel.: (21) 2108-0808 / fax: (21) 2108-0800

editora@zahar.com.br / www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Grafia atualizada respeitando o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Preparação: Angela Ramalho Vianna

Revisão: Claudia Ajuz, Michele Mitie Sudoh

Ilustrações: Érico Goulart

Capa: Dupla Design

Foto da capa: NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA

CIP-Brasil. Catalogação na fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ

N83d Novello, Mário, 1942-
2.ed. Do big bang ao Universo eterno / Mário Novello. — 2.ed. —
Rio de Janeiro: Zahar, 2010.

il.

Apêndices
Inclui bibliografia e glossário
ISBN 978-85-378-0237-3

1. Cosmologia. 2. Evolução. I. Título.

10-3983

CDD: 523.1
CDU: 524

Somente no final da década de 1970 descobriu-se a primeira solução analítica das equações da teoria da relatividade geral de Einstein, representando uma cosmologia sem singularidade. Essa solução descreve um Universo eterno espacialmente homogêneo, colapsando a partir do vazio. Seu volume total diminui com o passar do tempo cósmico, até atingir um valor mínimo, e, a partir daí, entra na atual fase de expansão.

Este livro é dedicado a meu amigo e colaborador José Martins Salim, com quem tive a alegria de descobrir esse modelo de Universo eterno.

Sumário

Prefácio 9

Prólogo 11

Antecedentes 17

1. A fase hegemônica do big bang (1970-2000) 21

Comentários 26

a) Energia necessária para a criação da matéria 26

b) Einstein e o big bang 28

2. O átomo primordial ou o modelo cosmológico do big bang 30

Modelo cosmológico-padrão 30

A questão fundamental da cosmologia 33

3. O primeiro cosmólogo da evolução: Alexander Friedmann 35

O sistema de arbitragem 36

Einstein: árbitro, ou do outro lado da produção científica 37

Comentários 40

a) Teoria da gravitação 40

b) Teoria da relatividade especial 43

c) Teoria da relatividade geral (gravitação) 46

d) Dependência cósmica das leis físicas 48

4. Uma pergunta malformulada 50

Transformando a questão fundamental da cosmologia em questão axiomática 51

Comentários 55

a) Teorema 55

b) A deformação do tempo 57

c) Dialeto newtoniano 58

d) Voltar ao passado 60

e) Sobre Gödel 63

f) Cenários de Universos eternos dinâmicos 66

5. O programa do Universo eterno 68

Steady state: a batalha perdida 70

Princípio cosmológico perfeito 71

6. A expansão acelerada do Universo, ou em busca de novas formas de energia 73

A energia escura: novos campos no Universo? 75

7. Diferentes modelos de big bang, diferentes modelos de Universo eterno 78

Universo magnético 79

Comentários 81

a) Singularidade no eletromagnetismo clássico 81

b) Buraco negro não gravitacional 82

c) O primeiro exemplo (1979) de um cenário do
Universo eterno dinâmico 83

d) Fótons e grávitons: eletrodinâmica e gravitação 84

e) Universo cíclico 85

Conclusão 88

Epílogo 90

Apêndice I: Diálogos sobre o começo do mundo 95

Apêndice II: Cronologia comentada da cosmologia 116

Glossário 125

Referências bibliográficas 130

Prefácio

A cosmologia tem como tarefa a refundação da física. Recentemente ocupei-me de expor esta ideia e mostrar as razões que sustentam esta afirmação.* Mas meu propósito aqui é de outra natureza. Neste livro, dedico-me a apresentar historicamente as circunstâncias que estão levando o modelo cosmológico conhecido como big bang a perder o caráter hegemônico que ostentou desde os anos iniciais da década de 1970 até há pouco tempo. Examinarei também o modelo cosmológico que, nos últimos anos, vem atraindo a atenção dos cientistas: o cenário de um Universo eterno dinâmico.

* M. Novello, *O que é cosmologia?*.

Prólogo

Em dezembro de 2007, concluí, com meu colaborador Santiago Bergliaffa, a redação de um artigo que uma revista científica me convidara a escrever, e que nos ocupou intensamente aquele ano todo. Tratava-se de analisar de modo crítico as diferentes propostas que os cosmólogos produziram, ao longo do século XX até os nossos dias, envolvendo modelos cosmológicos não singulares, isto é, modelos que se opõem frontalmente ao antigo cenário-padrão chamado big bang.

O resultado dessa análise — em que examinamos mais de 400 trabalhos científicos — foi um artigo longo, de mais de 100 páginas, que ganhou o título de “Bouncing cosmologies”.^{*} Quando, no final do mesmo ano, enviamos o texto para a prestigiosa revista *Physics Report*, nos demos conta de que aquele era um momento simbólico do fim do paradigma paralisante do modelo explosivo. Com efeito, era a primeira vez, desde os anos 1970 — data que marca o começo da hegemonia do cenário da grande explosão —, que uma revista científica de tão elevada reputação na comunidade internacional da ciência abria tamanho espaço para examinar a questão crucial da cosmologia, a origem do Universo, fora do contexto simplista do cenário big bang.^{**}

^{*} O termo inglês *bouncing* poderia ser traduzido por “ricochete”.

^{**} Neste livro, não me deterei na apresentação dos detalhes técnicos que sustentam meus comentários. O leitor mais dedicado, e cujo interesse se prolonga até as análises formais específicas sobre as quais os argumentos aqui reunidos se baseiam, pode consultar o artigo mencionado.

Nesse cenário, o momento singular, caracterizado por uma condensação máxima pela qual o Universo passou há uns poucos bilhões de anos, é identificado ao “começo do Universo” e não permite análise ulterior. Em oposição, no cenário não singular, o Universo não tem um “começo” separado de nós por um tempo finito em nosso passado; aquele momento de condensação máxima nada mais é que um momento de passagem de uma fase anterior para a atual fase de expansão.

No modelo cosmológico do Universo eterno, nesses cenários não singulares, dá-se um passo a mais, ao procurar uma explicação racional para a expansão do volume total do Universo. Dito de outro modo, trata-se de retirar o limite que os cientistas se impuseram arbitrariamente, no século XX, rumo à análise do que teria ocorrido antes do momento de máxima condensação, produzindo aquele estado único, especial, a partir do qual o volume total do espaço aumentaria com o passar do tempo cósmico, exibindo uma expansão.

O presente livro, baseado no artigo de 2007 e em uma série de conferências que realizei ao longo de 2007 e 2008, introduz o leitor não especialista à seguinte questão: o Universo teve um começo em um tempo finito, ou ele é eterno?

Neste momento, talvez fosse relevante abrir um pequeno parêntese para um comentário pessoal que me parece bastante significativo e exemplifica muito bem por que se manteve durante tanto tempo a exagerada hegemonia de que desfrutou o cenário big bang.

Quando, há uma década, eu estava passando um período de colaboração com cientistas da Universidade de Lyon, na França, fui convidado pelo Conselho Cultural de Villeurbanne — região onde está situada aquela Universidade — a apresentar uma conferência para o grande público sobre os avanços da cosmologia. Ao conversar com alguns professores sobre a palestra, comentei que iria apresentar as duas alternativas que os cientistas haviam

elaborado para descrever as origens do Universo: as propostas do big bang e do Universo eterno.

Um professor da Universidade de Lyon fez então um comentário que me espantou enormemente. Embora conhecendo minhas críticas a este modelo, disse que eu deveria falar apenas do big bang, acrescentando que não caberia enfatizar as dificuldades de princípio que ele possui. “Para as pessoas que não são especialistas em cosmologia, e mesmo para cientistas de outras áreas”, continuou, “não se devem explicitar dúvidas que os cosmólogos possam ter sobre a evolução do Universo. Segundo ele, isso só contribuiria para reduzir o status dessa ciência, abrindo espaço para o aparecimento de explicações de caráter não científico e até transcendentais.” Acrescentou que isso se devia à particularidade da cosmologia e à grandiosidade do objeto de seu estudo, estas centenas de bilhões de galáxias e estrelas que podemos observar no Universo.

Respondi-lhe que aquilo ia contra meu propósito de ensinar, entendendo que esta função tem por principal atributo pôr em dúvida todo conhecimento, incluindo aquele que se pretende isento de críticas. E também que vivíamos uma situação de transição, na qual o antigo modelo big bang perdia seu caráter absolutista e hegemônico — o que efetivamente aconteceu na década seguinte. Ademais, acrescentei, deveríamos ter todo cuidado ao deixar sair dos laboratórios e passar para a sociedade informações que os cientistas estão longe de poder demonstrar com toda certeza. Mais ainda: como essas verdades provisórias alcançam imediatamente as páginas dos jornais cotidianos e das revistas não especializadas, devemos, logo que possível, esclarecer e enfatizar essa condição efêmera, com mais razão ainda quando se trata de questões envolvendo tema tão sensível quanto o “começo de tudo”.

Embora o problema da “origem do Universo” não tenha, para os cosmólogos, importância primordial — pois é um dentre vários com que se defrontam na produção de uma explicação racional a

respeito dos diversos fenômenos observados no Universo —, para a maioria das pessoas ele apresenta um interesse fantasticamente grande, que vai muito além da simples curiosidade eventual e passageira. A razão para isso tem a mesma origem daquela que impulsionou os povos do passado, ao longo da história de todas as civilizações, a produzir mitos cosmogônicos sobre a criação.

O estudo desses diferentes modos de conceber, nas civilizações antigas, de onde e como surgiu tudo que existe possui uma bibliografia vasta e bastante específica.* Quanto à forma científica de organizar e divulgar essa questão, a quase totalidade de textos de fácil acesso se limita à versão da criação explosiva. Isso seria aceitável se ela fosse validada pela observação, sem que houvesse qualquer explicação alternativa. Mas, ao contrário, como veremos, ela é precisamente o modelo que inibe uma história racional completa do Universo.

Nas últimas três décadas, houve uma exagerada exposição e exaltação do big bang. Por outro lado, existe um desconhecimento quase completo a respeito do cenário do Universo eterno. Este livro pretende equilibrar a situação. Em alguns capítulos, acrescentei comentários sobre assuntos abordados no texto. No final do livro, incluí um glossário com o intuito de complementar informações e reunir definições simplificadas de termos técnicos.**

Antes de começarmos nossa caminhada, porém, devo fazer um comentário adicional. Nos últimos anos, por diferentes razões, a cosmologia tem estado permanentemente sob os holofotes da mídia, seja na imprensa, na televisão ou mesmo em discos com-

* Talvez um dos mais interessantes seja o livro *La naissance du monde*, que contém um relato bastante completo sobre as cosmogonias dos principais povos da Antiguidade. Ver E. Cotta Mello, “Estudo sobre as cosmogonias nas civilizações antigas”.

** No Apêndice II apresenta-se uma cronologia da cosmologia, incluindo os momentos simbólicos mais importantes desta ciência.

pactos. É fácil constatar que muitas das informações referentes ao big bang são produzidas sem que se obedeça ao compromisso fundamental que qualquer divulgador da ciência — seja ele cientista ou não — deve cumprir. Como a divulgação científica se destina, na maior parte das vezes, a não especialistas — que não possuem as ferramentas formais para avaliar criticamente o que lhes é apresentado —, toda afirmação que se faz e que não teve ainda sua veracidade confirmada pelos métodos convencionais, absolutos e universais da ciência deve exhibir para o ouvinte e/ou o leitor sua condição limitada ou provisória. Caso contrário, como já comentei, esse uso indevido do status elevado que a ciência possui nada mais será que uma “máscara atrás da qual se esconde um poder político que não ousa se declarar como tal”.*

* M. Novello, *Cosmos et contexte*.

Antecedentes

Mesmo sem ter produzido uma explicação racional sobre a origem do Universo, o modelo big bang — isto é, a ideia de que o Universo foi criado por uma grande explosão que teria acontecido há cerca de poucos bilhões de anos — dominou o cenário cosmológico durante a maior parte da história moderna da cosmologia, em particular dos anos 1970 a 2000. Isso pode ser atribuído a várias circunstâncias que adiante teremos oportunidade de esclarecer.

Embora essa imagem extremamente simplista do que teria ocorrido no início da atual fase de expansão do Universo não tenha sido ainda abandonada de todo, devemos reconhecer que ela não está mais dotada do vigor e da hegemonia que possuía no passado recente. São várias as causas dessa mudança de paradigma no imaginário do cientista. Como veremos, uma das mais relevantes está associada a observações astronômicas recentes, que foram interpretadas como se a expansão do Universo estivesse acelerada.

Há aqui, contudo, um detalhe que tem faltado às análises envolvidas na questão do big bang — e que vai além do simples exame deste modelo e de seu possível poder explicativo. É verdade que, ao ser indagado se “o Universo é singular?”, ou se “existiu um momento único de criação deste nosso Universo?”, grande número de cosmólogos respondeu que “sim” — embora com maior frequência nas duas últimas décadas do século passado. Mas a indagação, embora explicita uma necessidade atávica do homem, estava malformulada. Essa não era a pergunta adequada,

pois, para respondê-la, é necessário empreender uma extrapolação impossível de ser controlada pela observação direta.

A boa questão — esta sim, possuindo consequências científicas relevantes — é um pouco menos preciosa, menos exuberante, em aparência, menos abrangente, embora bem mais fundamental. A pergunta que deve ser feita é esta: pode a ciência produzir uma explicação racional para a evolução do Universo se o big bang for identificado com o começo de tudo que existe? Para entendermos completamente a questão, precisamos esclarecer as propriedades deste modelo. No entanto, é possível, antes disso, esboçar uma primeira visão das dificuldades intransponíveis que um cenário explosivo provoca. Essa conclusão depende diretamente do modo pelo qual os cientistas constroem uma descrição racional do Universo.*

De um modo geral, a física se organiza a partir do princípio de Cauchy, que descreve o modo pelo qual se dá o concerto entre teoria e observação. Ao se realizar uma experiência, obtém-se certo número de informações sobre dado processo físico. Com a repetição desta ou de outras observações, amplia-se o conhecimento de diferentes propriedades associadas ao fenômeno em questão. Esse processo é então descrito por uma teoria que permite conhecer a evolução temporal do fenômeno e sobre ele inferir previsões. Novas observações permitem então verificar a validade ou não das previsões. O procedimento é bastante geral — e até uma história do Universo pode ser estabelecida segundo tal modo convencional de organização.

Assim, o cientista produz uma explicação dos fenômenos segundo o esquema “observação-teoria-observação”. Para que

* Os próximos parágrafos são um tanto técnicos, mas indispensáveis para que o leitor possa entender como se organiza o pensamento científico a fim de produzir um modelo cosmológico completo.

se possa seguir o procedimento convencional na cosmologia, é indispensável obter observacionalmente informações sobre as características do Universo em dado momento. Só assim se poderiam elaborar e testar teorias globais a respeito de sua evolução. Se, por alguma razão, em determinado momento, não for possível medir quantidades físicas de natureza global associadas ao Universo como um todo, esse modo de proceder não pode ser adotado.

Há várias condições para que o procedimento possa ser efetivado. A mais simples e fundamental delas requer que todas as grandezas envolvidas sejam descritas por quantidades finitas. Isso se deve ao caráter finito de toda observação, pois qualquer medida demanda um número real e finito para caracterizá-la. Assim, ao identificar o começo de tudo a uma explosão inicial — como faz a proposta do cenário big bang — em que quantidades a princípio observáveis atingiriam, segundo o modelo, o valor infinito (como a densidade de energia total do Universo), esta condição básica não estaria preenchida.

Segue-se daí, como consequência inevitável, a impossibilidade de construir uma ciência da natureza envolvendo a totalidade do que existe: não seria possível construir uma base teórica a partir da qual se estabeleceria uma história completa do Universo. A cosmologia não descreveria esta totalidade. Assim, no modelo big bang *stricto sensu*, a cosmologia não poderia se constituir como ciência.

1 A fase hegemônica do big bang (1970-2000)

Embora a ideia de que o Universo está em expansão fosse bem aceita desde a observação feita por Edwin Hubble, no final da década de 1920, foi somente na segunda metade dos anos 1960 que ela passou a ser entendida como consequência natural de uma grande explosão que teria ocorrido há cerca de poucos bilhões de anos. Dois grandes acontecimentos concorreram para isso, um de natureza observacional e outro de natureza teórica, formal.

Em 1964, dois radioastrônomos americanos, Arno Penzias e Robert Wilson, detectaram estranhos sinais bastante regulares que foram interpretados mais tarde como resquícios de uma fase extremamente quente do Universo. Isso foi resultado da observação de uma radiação eletromagnética que os físicos conhecem de suas experiências em laboratórios terrestres — e que não passam de grãos de energia da luz (de frequência de onda não visível), fótons em grande quantidade que se comportam como se estivessem em equilíbrio térmico.* Uma utilização simples da lei de conservação de energia permitiu concluir, a partir da observação, que a temperatura de equilíbrio desse gás de fótons foi maior no passado. Em verdade, entre sua temperatura e o fator de escala ou “raio do Universo” existe uma relação importante: elas são

* Esta radiação já havia sido detectada anteriormente, em 1941; no entanto, sua importância na descrição do cosmo passou praticamente despercebida dos físicos. (Cf. Apêndice II, “Cronologia comentada da cosmologia”).

inversamente proporcionais. Isso significa que, quanto maior o volume do espaço, menor a temperatura, e vice-versa.

Por outro lado, houve uma evolução formal, consubstanciada em alguns teoremas que, a partir de considerações gerais envolvendo a evolução de processos descritos pela interação gravitacional, levaram à interpretação de que uma singularidade inicial — imediatamente associada ao big bang — seria uma característica típica do Universo.

Essas duas descobertas foram cruciais no sentido de criar condições para o estabelecimento e ascensão do modelo explosivo de Universo. Entre os físicos, o impacto desses resultados foi notável. Nas palavras de Steven Weinberg: “Aquilo que a descoberta, em 1965, da radiação cósmica de fundo de 3° Kelvin realizou de mais importante foi nos forçar a considerar seriamente a ideia de que houve efetivamente um começo do Universo.”*

Em verdade, não foi essa descoberta que induziu os físicos a pensar que teria havido um instante de “criação do Universo”. A verdadeira responsável por isso foi a ideologia que estava além das observações, e que os levou a concluir abruptamente que, se o Universo tivesse sido mais quente no passado, não deveria haver limite superior à sua temperatura. Consequentemente, ela teria atingido o valor infinito em um tempo separado de nós por um valor finito — uns poucos bilhões de anos. Teria havido uma grande explosão inicial dando origem a tudo que existe!

Conquistar uma posição de destaque junto à comunidade científica foi uma tarefa árdua para o modelo big bang. O livro já mencionado de Weinberg serviu e muito para isso. Afinal, uma afirmação tão eloquente e peremptória quanto a que citamos, feita por um laureado com o Prêmio Nobel, certamente tem grande repercussão entre os físicos. Não é exagero afirmar que foram

* S. Weinberg, *Les trois premières minutes de l'Univers*.

atitudes como a de Weinberg e seus seguidores que permitiram à cosmologia penetrar em territórios da ciência dos quais ela era até então excluída.

Para citar dois exemplos, foi a partir de então que tanto o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern) quanto o Laboratório Fermi de Chicago (Fermilab) passaram a integrar a cosmologia entre suas atividades principais de investigação.* Nesse momento, a cosmologia começou a ser considerada uma área atraente de pesquisas. Mais importante que isso, havia uma razão de natureza extrínseca para que o cenário explosivo fosse bem-visto pela comunidade de físicos destes e de outros centros na Europa e nos Estados Unidos, também envolvidos no mesmo objetivo, intimamente relacionado à crise das altas energias,** na década de 1970. Essa parte da física requeria e ainda requer, para seu desenvolvimento, a construção de enormes aceleradores extraordinariamente dispendiosos e cuja construção enfrentava obstáculos políticos tanto na Europa quanto nos Estados Unidos.

Ora, o cenário descoberto pelo matemático russo Alexander Friedmann, que descreve um Universo dinâmico, em expansão, como um processo evolutivo, permitiu vislumbrar um território novo. Ele foi então escolhido para substituir, no imaginário dos físicos, a ausência de máquinas de acelerar partículas, impossíveis de se construir por razões financeiras.

As causas aceitas para essa substituição estavam associadas ao sucesso da cosmologia. Com efeito, o modelo-padrão do Universo baseia-se na existência de uma configuração que descreve seu conteúdo material como um fluido perfeito em equilíbrio termodinâmico, cuja temperatura T varia com o inverso do fator de

* Cern e Fermilab são importantes centros de pesquisa que tradicionalmente abrigavam grande número de cientistas dedicados a pesquisas de átomos e de partículas mais elementares.

** Também conhecida como física de partículas elementares.

escala; isto é, quanto menor o volume espacial total do Universo, maior a temperatura.

Assim, nos primórdios da atual fase de expansão, o Universo teria passado por temperaturas fantasticamente elevadas, excitando partículas, expondo o comportamento da matéria em situações de altíssimas energias bastante semelhantes às que se encontram nos grandes aceleradores de partículas. E, o que era mais conveniente, quase de graça, sem novos custos — bastava olhar para o céu. Este se tornou o estopim para que o modelo big bang fosse aceito como uma boa teoria por parte daqueles cientistas que trabalhavam com a física das altas energias e depois por toda a comunidade de físicos.

Embora se tenha feito certo esforço para que o big bang passasse a desfrutar de aceitação e, mais que isso, de consagração como a boa descrição da dinâmica do Universo, transpor isso para a sociedade foi bastante mais fácil, e não aconteceu por acaso. O sucesso da ideia fora do círculo científico, na sociedade em geral, se deve ao fato de que ela possui várias características que foram e ainda são consideradas vantajosas para uma descrição da totalidade. A aceitação da existência de um momento singular — o instante de criação (identificado com a explosão) —, por exemplo, está intimamente relacionada ao imaginário de várias sociedades arcaicas.

Esse modo de descrever a criação, os momentos iniciais do Universo, tem seu análogo em diversas religiões que identificam em suas cosmogonias o tempo mítico/mágico no qual os deuses se debruçaram para além de suas atividades usuais a fim de empreender a criação do mundo. Na comunidade judaico-cristã, em particular, a ideia de um começo único e singular pareceu a muitos — incluindo o papa Pio XII* — uma descrição científica

* Na edição de maio de 2008 do *Osservatore Romano*, o diretor do Observatório do Vaticano, Jose Gabriel Funes, afirmou estar convencido da

da criação do Universo bastante aceitável e até desejável, posto que de fácil adaptação aos ensinamentos de livros religiosos fundamentais, como a Bíblia.*

Modelos alternativos sustentando a ideia de que o momento de condensação máxima não é uma barreira intransponível e pode ser analisado como resultado da existência de uma fase anterior só passaram a ser considerados competitivos com o modelo big bang, por parte do establishment, na virada do século XXI. Os defensores desses cenários argumentam que a extensão de duração do Universo não é mensurável, arrastando o que poderíamos chamar de “momento de criação” para o infinito passado.

Tanto o modelo big bang quanto os diferentes modelos de Universo eterno produzem dificuldades de compreensão que vão além da simples questão técnica. Nas últimas décadas, a sociedade parece ter se acostumado a retirar o peso formal do modelo big bang. Isso se deve à sua popularização, graças à enorme publicidade que a mídia e alguns cientistas, em livros, jornais e revistas não científicas, produziram nos últimos anos. Como a alternativa principal — o cenário do Universo eterno — não desfruta ainda dessa popularidade, algumas questões de princípio surgem e não são sublimadas pela mídia, deixando transparecer dificuldades atribuídas a este modelo, mas que em verdade são genéricas, inerentes a toda e qualquer cosmologia.

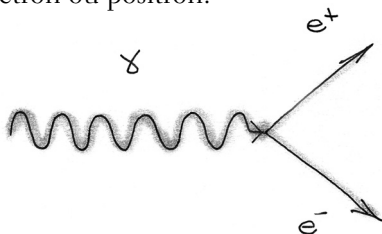
validade da teoria do big bang para explicar a origem do mundo, considerando-a “completamente compatível com a existência de Deus”.

* Curiosamente, as civilizações antigas elaboraram também mitos cosmogônicos que podemos associar a universos eternos, nos quais a criação ocorreu “em uma época tão remota que não podemos sequer contar quanto tempo se teria passado desde então”, *La naissance du monde*.

Comentários

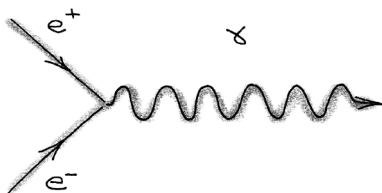
a) *Energia necessária para a criação da matéria*

Uma das grandes novidades trazidas pela mecânica quântica foi a descoberta de que cada partícula material possui sua simétrica, chamada antimatéria. Assim, por exemplo, o elétron, que tem uma unidade elementar de carga elétrica, possui sua antipartícula, chamada antieletrôn ou pósitron.



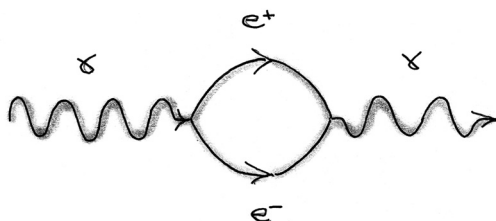
Criação de par virtual: um fóton energético cria um par virtual de partículas, no caso, um elétron e sua antipartícula, chamada pósitron ou antieletrôn.

O pósitron também tem uma unidade elementar de carga elétrica, mas de sinal oposto. Assim, quando um elétron encontra um pósitron, eles se aniquilam. A carga elétrica total, ou seja, a soma de cada carga individual, é zero — e deve permanecer zero depois da aniquilação. O que resulta desse processo? Nada mais que fótons, os grãos elementares de luz.



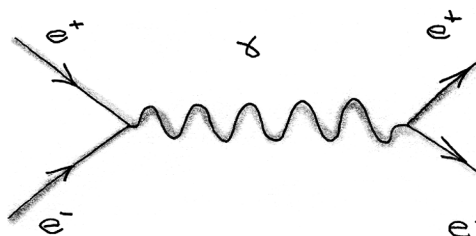
Aniquilação da matéria: um elétron e sua antipartícula, o pósitron, se aniquilam, gerando um fóton.

De modo análogo, e inversamente, um fóton pode se transformar em um par partícula/antipartícula. Se a energia desse fóton for igual ou superior à soma das energias necessárias para criar um elétron e um pósitron, o fóton pode gerar um par virtual elétron-pósitron.



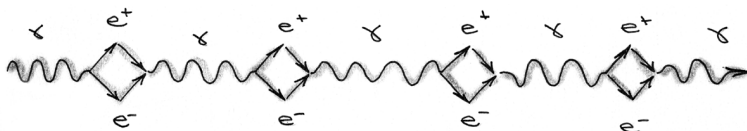
Um fóton energético cria um par virtual de partículas — um elétron e um pósitron — que imediatamente se aniquilam, gerando um fóton.

Logo imediatamente a seguir, o par se aniquila pelo processo anterior e gera novamente o fóton.



Aniquilação da matéria: um elétron e sua antipartícula, o pósitron, se aniquilam, gerando um fóton, que cria um par de partículas — um elétron e um pósitron.

O processo pode se repetir em um número extremamente grande de vezes. Iremos ver, no capítulo referente à instabilidade do vazio quântico, como esse processo pode estar na origem da formação do Universo.



Sucessão de processos de criação/destruição de pares de partícula/antipartícula e fótons (no exemplo, o par elétron/antieletron).

Diz-se que essa sucessão de criação/destruição de partículas é virtual porque ela não produz efetivamente matéria — pois se trata de uma série de processos de soma nula.

Por outro lado, a gravitação — o próprio colapso ou a expansão do Universo — é capaz de transformar aquela série de virtualidades em um mecanismo de criação de matéria real. É possível, assim, que a matéria tenha origem no próprio processo de evolução do Universo.

Essa possibilidade cria uma incômoda e curiosa situação que pode ser resumida do seguinte modo: a matéria que gera gravitação é formada pelo processo dinâmico gerado pela gravitação.

b) Einstein e o big bang

Há uma intervenção, feita pelo criador da cosmologia moderna, que decidi apresentar aqui, pois nela Albert Einstein se posiciona frontalmente contra o big bang por razões que ficaram esquecidas e agora remontam à cena. Diz ele em seu livro de 1948, intitulado *O significado da relatividade*:

Em relação à questão da singularidade inicial dos modelos cosmológicos, eu gostaria de dizer o seguinte: a teoria atual da relatividade se baseia na divisão da realidade física em um campo métrico (a gravitação), por um lado, e o campo eletromagnético e a matéria, por outro. Na realidade, o espaço provavelmente terá

caráter uniforme, e a teoria atual somente será válida como um caso limite. Para grandes valores do campo e da densidade de matéria, as equações do campo e até as próprias variáveis que intervêm nestas equações não possuem significado real. Não é possível, assim, admitir a validade de tais equações para densidades de campo e de matéria muito elevadas. Consequentemente, não se pode concluir dessas equações [da relatividade geral], ao serem aplicadas ao Universo, que o início da expansão do Universo se identifique com uma singularidade no sentido matemático. Tudo que devemos reconhecer é que as equações [da relatividade geral] não são aplicáveis nessas regiões.*

* A. Einstein, *El significado de la relatividad*, p.154.

2 O átomo primordial ou o modelo cosmológico do big bang

Para realizar o que prometemos antes, e para que nossa descrição não seja demasiadamente longa, vamos começar a análise pelas grandes linhas de investigação que dominaram o cenário da cosmologia a partir dos anos 1970.

Isso significa que não irei descrever nem comentar alguns dos mais importantes modelos cosmológicos simples que receberam os nomes de seus criadores, como os de Einstein (1917), De Sitter (1919), Kasner (1923) e Gödel (1949). A única exceção será o modelo de Friedmann (1919), por sua enorme atualidade. Isso não significa que os outros possam ser eliminados da análise cosmológica. Por exemplo, qualquer estudo consequente sobre a estrutura do tempo e a causalidade não pode ignorar as profundas questões formuladas por Gödel na apresentação de seu modelo cosmológico. Simplesmente quero limitar o foco de nossa atenção, e para isso devemos restringir o alcance da análise.*

Modelo cosmológico-padrão

Ao longo do século XX, os cientistas desenvolveram um cenário-padrão baseado na ideia de que o Universo é um processo em evolução e seu volume total aumenta com o passar do tempo. Tal

* Em *Máquina do tempo* e *O que é cosmologia?*, dediquei-me à análise dessas questões.

modelo fornece uma descrição bastante boa de sua evolução desde os tempos recentes até aproximadamente alguns bilhões de anos atrás, e ele foi aceito pela quase totalidade dos cosmólogos. Quanto ao que teria ocorrido quando o Universo estava no momento de máxima condensação, a unanimidade desaparece: o modelo big bang sustenta que o início, ocorrido há poucos bilhões de anos, foi singular, explosivo; o modelo de Universo eterno advoga que esse início pode ser prolongado por muito mais tempo. Ambas as descrições estão baseadas em algumas poucas hipóteses essenciais que devemos deixar claras. Vamos resumí-las de modo esquemático:

1. Existe um tempo cósmico global que permite dividir o espaço-tempo quadridimensional em termos de uma estrutura identificada com um espaço tridimensional (que chamamos simplesmente de “espaço”) e uma dimensão temporal (ou “tempo”).
2. A força gravitacional, principal responsável pelos efeitos globais no Universo, é descrita pela relatividade geral. Nessa teoria, a gravitação determina a geometria do espaço-tempo, e sua intensidade é medida pela curvatura dessa geometria.
3. A fonte dessa curvatura se identifica a um fluido perfeito, isto é, seu conteúdo material é descrito por uma distribuição contínua de energia/matéria.
4. Em grandes domínios do espaço, além de uma certa escala de distância de valor bastante elevado, a estrutura do Universo é espacialmente homogênea e isotrópica. Isso significa que qualquer lugar do Universo possui propriedades iguais. Em particular, em qualquer direção que apontemos nossos telescópios, as mesmas características serão observadas.

Vamos comentar brevemente cada uma dessas quatro condições que são pré-requisitos de todo modelo cosmológico, seja ele singular (como o big bang) ou eterno.

O Universo, a totalidade do que existe, é descrito como uma estrutura em quatro dimensões na qual se impõe a separação do espaço tridimensional e do tempo unidimensional. Essa divisão do mundo em termos quase newtonianos é possível quando se admite a hipótese de que em nenhum lugar existe um caminho, capaz de ser percorrido por um observador real — homem ou máquina —, que possa levar ao passado. Tal hipótese funciona como um eficiente instrumento de trabalho e simplifica muito a descrição dos fenômenos, sem acarretar uma restrição muito forte às possíveis configurações do Universo. Na verdade, somente o modelo cosmológico de Gödel (*ver* adiante), dentre todos os conhecidos com algum destaque, não preenche esta condição.

A segunda condição decorre do status de que a relatividade geral desfruta atualmente. Ela produziu uma descrição da força gravitacional compatível com todas as observações realizadas. É bem verdade que até hoje não foi possível detectar, por observação direta, as ondas gravitacionais — uma das previsões que a teoria sugere.*

A terceira hipótese talvez seja um dos pontos mais fracos da lista. Não temos evidência — a não ser indireta — da totalidade da matéria e energia existentes, e, por conseguinte, do modo pelo qual elas podem ser descritas. A ideia de um fluido perfeito, resquício da era em que a cosmologia carecia de observações consistentes, constitui uma configuração bastante simples e que pode servir como uma primeira aproximação do verdadeiro conteúdo material-energético relevante para a disciplina.

Quanto ao quarto item, ele se sustenta a partir da generalização das observações locais para todo o Universo, o que consiste em

* No entanto, uma nova geração de detectores espalhados pelo mundo talvez em breve nos permita — caso elas realmente existam — observar essas ondas.

uma aplicação do princípio estendido de Copérnico, segundo o qual não ocupamos lugar especial no Universo. Isso significa que, se observarmos em nossa vizinhança homogeneidade espacial e isotropia, então essa característica deve ser estendida para todos os demais pontos do Universo.

A questão fundamental da cosmologia

Para completar essa introdução, devemos notar que, ao longo do século XX, a cosmologia passou por três momentos cruciais, que podem ser simbolizados de um modo simples, como se fossem formados pelas respostas dadas a três questões fundamentais:

1. O Universo é estático ou dinâmico?
2. A evolução do Universo é estacionária ou varia não uniformemente com o tempo?
3. Houve um “começo” em um tempo finito de nosso passado, ou o Universo é eterno?

A primeira questão dominou o cenário da cosmologia desde o início da segunda década do século XX até o final dos anos 1930; a segunda questão passou a ser predominante até a metade dos anos 1960; e, desde então, vivemos em plena era da terceira das questões principais.

O século passado nos legou uma história fascinante sobre a visão que os cientistas produziram e que constituiu um desenvolvimento notável no conhecimento dos aspectos globais da natureza, modificando em profundidade a imagem que a ciência possuía do Universo. Passou-se de uma situação em que a totalidade do que existe era identificada com uma configuração imóvel, estática, congelada, para a visão atual, na qual o Universo é entendido como um processo evolutivo a que se pode atribuir uma história.

No primeiro movimento de construção da cosmologia relativista, parecia natural para Einstein aceitar — *a priori*, sem embasamento observacional — que o Universo não é uma estrutura dinâmica. Assim, ele criou em 1917 o primeiro modelo cosmológico, descrito globalmente por uma geometria estática, independente do tempo. Sem ter à sua disposição os meios necessários para confrontar seus argumentos *a priori* sobre o Universo com a observação, Einstein chegou a essa geometria, à solução de suas equações da gravitação, graças a uma argumentação formal, guiada somente pelo preconceito de uma ideologia. A partir da hipótese de ausência de dependência temporal na geometria que descreveria o Universo considerado em sua totalidade, sem a possibilidade de confrontar seus argumentos com a observação, Einstein produziu o primeiro modelo cosmológico do século XX.

A força dessa ideologia era tão grande que, para poder levar adiante seu projeto de instituir uma cosmologia a partir de suas equações da relatividade geral, Einstein foi obrigado a modificar sua então recém-criada teoria da gravitação. Introduziu uma constante universal que possui uma característica etérea, resquício dos absolutismos cósmicos da ciência newtoniana. Foi essa a única estrutura material que sua imaginação produziu para constituir a fonte dessa geometria inerte e imutável.

Mas aquilo que parece óbvio ou natural para uma pessoa ou grupo de pessoas em uma dada época pode parecer totalmente desqualificado, inútil ou desprovido de interesse em outro período, em outro contexto. Isso ocorre mesmo quando se trata de uma observação, pois o substrato teórico no qual uma observação ganha significado e se insere no corpo formal de conhecimentos aceitos como verdadeiros também se submete a essa regra. Com a cosmologia não poderia ser diferente, como logo ficou evidente. A década de 1920 foi o período principal em que se estabeleceram as bases para o que viria a ser o cenário-padrão da cosmologia, graças principalmente ao trabalho seminal de um cientista russo.

3 O primeiro cosmólogo da evolução: Alexander Friedmann

Difícilmente iremos encontrar, na história da cosmologia moderna, personagem tão importante quanto o matemático e físico russo Alexander Friedmann (1888-1925). Nos últimos anos, graças a uma ação internacional liderada principalmente por cientistas originários de sua cidade natal, São Petersburgo, um congresso internacional que leva seu nome lhe é dedicado a cada dois anos.* Alguns comentários sobre sua descoberta são importantes para situar e evidenciar o impacto de seu trabalho na evolução da cosmologia desde as primeiras décadas do século passado.

No final dos anos 1920, Friedmann submeteu à publicação na revista alemã *Zeitschrift für Physik* uma análise da questão cosmológica distinta daquela contida na solução original proposta pelo fundador da cosmologia moderna. A principal novidade consistia em tratar a questão como um processo dinâmico, no qual, contrariamente ao modelo de Einstein, exibia-se uma evolução do Universo, uma dependência temporal de suas propriedades mais fundamentais e, em particular, de sua geometria. No entanto, o apriorismo de um Universo estático — a famosa hipótese introduzida por Einstein em seu primeiro modelo cosmológico — mostrou-se tão fortemente reacionário que conseguiu evitar, por mais de um ano, a publicação do trabalho de Friedmann.

* O Departamento de Física da Universidade Federal de João Pessoa, Paraíba, já sediou mais de uma vez esse congresso. Em 2008, ali foi realizado o último Friedmann Seminar.

Há uma curiosidade relativa à publicação desse artigo seminal da cosmologia moderna que vale um desvio de sua descrição para nos determos numa questão colateral, pois talvez ela seja útil para o leitor conhecer os mecanismos pelos quais uma produção científica chega a alcançar a notoriedade. Nós não penetramos os bastidores dos modos pelos quais a ciência como atividade social se organiza, se estrutura e adquire uma prática de ação. Mas faremos um comentário que permitirá ao leitor que tem pouco acesso aos mecanismos de produção e articulação de trabalhos científicos ter conhecimento dos obstáculos que esses trabalhos são obrigados a ultrapassar para conquistar o lugar de destaque que alguns realmente merecem.

O sistema de arbitragem

As revistas científicas nas quais são publicados os trabalhos originais desenvolvidos nos institutos de pesquisas, laboratórios ou universidades possuem uma característica singular que talvez não seja do conhecimento do leitor não cientista. Ao submeter um artigo que contenha pesquisas originais, capazes de fazer avançar o conhecimento, todo pesquisador sabe que deve obedecer a uma sequência de procedimentos típicos convencionais. Dentre eles, o mais singular e específico consiste no fato de que o editor da revista irá encaminhar o trabalho para um ou mais cientistas que servirão como seus juízes ou árbitros. Tais cientistas — que permanecem no anonimato e, o mais das vezes, sem remuneração para exercer essa atividade — serão praticamente os responsáveis não somente por analisar a qualidade do artigo como também por avaliar se ele não se desvia demasiado da linha editorial do periódico. Dito de modo mais simples, são eles que terão maior peso para decidir se o artigo submetido preenche ou não as condições de aceitabilidade que a revista se impõe.

Esse sistema possui inúmeras dificuldades e certamente pode funcionar muitas vezes como fator de manutenção das ideias e conceitos aceitos pela maioria. Mas é assim que a totalidade das revistas científicas funciona. Creio que não é difícil imaginar que este sistema eventualmente permite que se pratiquem enormes injustiças.

Einstein: árbitro, ou do outro lado da produção científica

Quando Friedmann submeteu seu trabalho à revista alemã *Zeitschrift für Physik*, a principal questão, para os editores, se relacionava à dificuldade de encontrar um cientista capaz de entender e avaliar a relevância de seu artigo. Quem escolher para dar um parecer sobre tema tão pouco comum entre os físicos de então? Quem poderia servir de consultor para um artigo sobre cosmologia numa época em que o número de cientistas interessados na questão se contava nos dedos de uma mão? Quem deveria ser chamado a dar um parecer sobre o artigo de Friedmann que não o próprio Einstein?

Aceitando servir como consultor da revista para onde Friedmann enviara seu trabalho intitulado “Sobre a curvatura do espaço”, em um primeiro momento Einstein rejeitou o artigo como se ele fosse destituído de interesse. Depois de resistir por mais de um ano a uma forte pressão de cientistas — em especial de físicos de São Petersburgo — que haviam reconhecido no trabalho uma nova visão da cosmologia no interior da teoria da relatividade geral, Einstein aceitou por fim que ele fosse publicado.

Insatisfeito com sua mudança de decisão, contudo, ele redigiu uma nota — intitulada “Nota acerca do trabalho ‘Sobre a curvatura do espaço’ de A. Friedmann” —, também publicada na revista *Zeitschrift für Physik*, em que apontava um erro de cálculo no artigo de Friedmann. Literalmente, Einstein dizia naquela

pequena nota que o resultado obtido por Friedmann — de um Universo cujas propriedades geométricas dependiam do tempo — lhe parecia suspeito (no original, *verdächtig*). Finalmente, em momento posterior — mas sem mostrar entusiasmo algum pela nova visão cosmológica —, admitiu que o artigo estava correto, e que o erro era seu.*

O que havia no artigo para induzir um dos grandes cientistas do século XX a assumir tão infeliz atitude e impedi-lo de aceitar a maravilhosa novidade que Friedmann trazia para o território da física, a saber, a dinâmica do Universo? A reação parece ainda mais chocante quando, ao analisarmos o suposto erro que Einstein atribuiu ao artigo de Friedmann, vê-se de imediato que Einstein estava errado. A decisão dessa disputa contra o criador da relatividade geral é tão simples de ser concluída que somos levados a procurar explicação em alguma forma de razão não científica. Talvez um mero preconceito, ou a arrogância, tenha impedido Einstein de reconhecer de imediato a justeza dos cálculos de Friedmann.

Mas, afinal, de que tratava o artigo? O que poderia ele trazer de tão contrário à sua visão de mundo para Einstein lhe devotar tamanha aversão? No texto de Friedmann, apresentava-se pela primeira vez uma nova solução das equações originais da teoria da relatividade geral. Nela, contrariamente à visão estática do modelo de Einstein, o autor demonstrava a possibilidade de se construir uma cosmologia dinâmica, com uma evolução — ideia nova, seminal, cheia de potencialidades na gestação de uma visão aberta do Universo e que ainda hoje domina o cenário da cosmologia.

* Em seu livro *Early Expanding Universe and Elementary Particles*, o físico russo de São Petersburgo Andrey Grib relata com detalhes a relação Einstein-Friedman com referência à publicação do artigo de seu conterrâneo.

As características que esse modelo atribui ao Universo são bastante simples e compõem-se de uma série de simetrias que permitem resolver as intrincadas equações da teoria da relatividade geral contidas nas seguintes hipóteses simplificadoras:

1. A curvatura do espaço-tempo é a medida da intensidade do campo gravitacional, de acordo com a relatividade geral.
2. O principal responsável pela curvatura pode ser descrito como um fluido contínuo de densidade de energia E e pressão P .
3. Entre E e P existe uma relação simples que se escreve $P = s E$, onde s é uma constante a ser especificada pelo modelo e que só pode assumir valores positivos menores que 1.
4. Tanto E quanto P dependem somente do tempo global, isto é, o espaço tridimensional é homogêneo: suas propriedades são as mesmas em qualquer ponto.
5. O Universo possui uma singularidade inicial em que o volume total do espaço é zero, e a densidade de energia é infinita.
6. Embora a força gravitacional seja somente atrativa, suas partes estão se afastando uniformemente umas das outras. Isso vale para todas as galáxias. Assim, cada galáxia vê todas as demais se afastarem dela.

Esse modelo teórico, cujas hipóteses, à época, não eram sustentadas por qualquer observação efetiva, resultou num bom cenário, capaz de descrever as propriedades observadas do Universo em grande escala. As observações de afastamento das galáxias feitas por Hubble, em 1929, e a detecção de uma radiação cósmica de fundo por Penzias e Wilson vieram tornar a geometria que Friedmann descobrira formalmente o cenário-padrão da cosmologia nas últimas décadas do século XX.

Comentários

a) Teoria da gravitação

Em 1915, o físico alemão Albert Einstein produziu uma pequena revolução conceitual na estrutura da geometria do espaço e do tempo, alterando profundamente a teoria da gravitação proposta três séculos antes por Isaac Newton e, desse modo, retirando da Inglaterra a honra de ter sido o berço do cientista que havia desvendado o segredo da interação gravitacional. Até chegar a esse ponto, a história é bem longa, e minha intenção é tratá-la apenas como uma pequena introdução para tornar mais clara a questão que estamos analisando aqui.

No final da Idade Média, graças ao longo trabalho desenvolvido por grande número de astrônomos — como Tycho Brahe e Johan Kepler —, já se conseguira acumular um número suficiente de informações sobre o mundo supralunar, permitindo o aparecimento de uma fantástica especulação a respeito da existência de uma força universal capaz de atuar sobre qualquer forma de matéria. Apoiando-se em observações locais, feitas em nossa vizinhança terrestre, acreditando na hipótese reducionista da unidade do mundo e apossando-se da simplificação formal como instrumento poderoso na elaboração da realidade, no final do século XVI os astrônomos estavam preparados para lançar a hipótese da existência da lei de gravitação universal. Foi o que Isaac Newton fez ao caracterizar a atração gravitacional como uma força que se espalharia instantaneamente por todo o espaço e seria tanto mais intensa quanto mais próxima do corpo material que a originara.

A lei universal da gravitação proposta no século XVI permitiu unificar todos os processos de atração de qualquer corpo material. Assim, toda forma de matéria, seja na Terra (como no famoso exemplo da maçã), seja em corpos celestes (como planetas e estrelas),

obedece a um único tipo de força, a gravitação universal. O efeito dessa força — por exemplo, a atração exercida por uma estrela como o Sol — seria sentido em todo o espaço, sendo que sua intensidade diminuiria com o inverso do quadrado da distância.

Essa primeira formalização da lei universal da gravitação foi certamente um imenso passo na descrição dos fenômenos astronômicos, permitindo melhor classificar e compreender os movimentos de corpos materiais em nossa vizinhança, obtendo enorme sucesso ao exhibir as causas de diversas regularidades no céu, e em particular o movimento dos planetas girando ao redor do Sol.

Durante quase 300 anos, os fenômenos que os astrônomos observavam nos céus foram bem-descritos por essa lei. Não havia qualquer necessidade observacional capaz de diminuir a certeza de sua validade por parte dos astrônomos. Entretanto, razões de natureza teórica, advindas de profundas alterações ocorridas na física, nos últimos anos do século XIX e no começo do XX, produziram um modo novo de descrever a realidade que resultou incompatível com a formulação newtoniana.

A descrição newtoniana ainda poderia ser usada como uma expressão aproximada dos fenômenos gravitacionais para explicar, de modo simples, por que, por exemplo, se eu soltar de minha mão esta caneta com que estou escrevendo este texto, ela cairá. Entendemos que isso ocorre graças à força que a Terra exerce sobre a caneta. Entretanto, tal explicação simples deve ser abandonada quando se trata de descrever processos na presença de campos gravitacionais muito intensos.

Antes de entrarmos nessa análise, devemos explicitar uma característica da teoria newtoniana, pois embora não provocasse qualquer dificuldade formal para sua aceitação, ela estava na origem da crítica maior que surgiu quando, na segunda década do século XX, Einstein produziu uma nova teoria da gravitação. Qual era essa propriedade que passou invisível aos olhos dos antigos?

A descoberta da existência da atração universal, que permitiu a compreensão de propriedades regulares observadas no movimento de planetas vizinhos, trazia embutida a ausência do tempo. A lei newtoniana tratava do movimento e, conseqüentemente, da passagem do tempo; e, no entanto, ela não apresenta nenhuma referência ao tempo. Isto é, a ação de um corpo sobre outro, essa interação universal que permitia compreender as leis locais de movimento dos planetas, era ela mesma instantânea: não exigia um “passar do tempo” para exercer sua ação; não precisava de tempo para que sua influência se fizesse sentir; ela se propagava como se possuísse uma velocidade infinita; ou, para ser mais exato, não se propagava.

Essa propriedade aparece hoje, aos olhos modernos dos cientistas, como totalmente inadmissível, pois mesmo os fótons — os grãos de luz que se movimentam com a maior velocidade possível — exigem tempo para ir de um lugar a outro. Um raio de luz leva alguns minutos para sair do Sol e chegar à Terra. E, quanto mais longe, maior seu tempo de percurso. Sabemos mesmo que, como as estrelas possuem um processo evolutivo, tendo um tempo de existência finito, podemos estar vendo no céu uma estrela que já não existe mais. Sua distância pode ser tão grande que, quando enxergamos a luz por ela emitida, e que demorou tanto tempo para atravessar os espaços siderais, a estrela talvez não exista mais, tendo explodido e dado origem a poeira estelar — o que só poderá ser observado da Terra em futuro longínquo.

No entanto, nos séculos que se seguiram a essa descoberta newtoniana e até o início do século XX, a condição instantânea da ação gravitacional era entendida como uma propriedade “natural”, igual às suas outras características. O fato de não ser observável não produzia desconforto de princípio para os cientistas. Em verdade, sequer era possível formular a questão: o tempo não aparecia como um ingrediente importante no modo newtoniano de descrever a ação gravitacional. Somente sua ação sobre um

corpo estava associada a uma variação temporal. O tempo aparecia como uma variável importante quando se acompanhava o movimento de um corpo sob a força gravitacional, mas não era mencionado entre as características dessa força.

Foi somente no final do século XIX e início do século XX que a instantaneidade da força gravitacional começou a ser entendida como um verdadeiro problema, uma dificuldade associada ao modo newtoniano de descrever esse campo de força. * Para entendermos essa mudança de atitude, devemos nos referir à revolução feita na física, no começo do século XX, por diversos cientistas, dentre os quais podemos citar Henri Poincaré, Hendrik Anton Lorentz e Albert Einstein, entre outros. Essa mudança foi sintetizada por Einstein no que chamou de teoria da relatividade especial. **

b) Teoria da relatividade especial

De um modo geral, exceto em uns poucos momentos singulares excepcionais, a atividade científica é um trabalho coletivo. E não somente nos caminhos pelos quais, a partir de observações de fenômenos na natureza, se estrutura uma mudança no modo de descrever a realidade, mas no próprio início da análise crítica de uma dada descrição formal, capaz de gerar uma mudança de paradigma. O caso da relatividade especial não fugiu a essa regra.

No final do século XIX, os físicos haviam conseguido organizar uma descrição da realidade sustentada em dois grandes esquemas conceituais, dois pilares sobre os quais praticamente

* Existe a possibilidade moderna de repensar essa interação a longa distância sem que haja uma ação intermediária. O leitor interessado pode consultar F. Hoyle e J.V. Narlikar, *Action at a Distance in Physics and Cosmology*.

** Também chamada por alguns autores de teoria da relatividade restrita.

toda a física se erguia: a mecânica e o eletromagnetismo. A mecânica permitia descrever movimentos dos corpos materiais gerados por quaisquer tipos de força. Além das forças de contato entre os corpos, o eletromagnetismo constituía, com a gravitação, as duas únicas forças de longo alcance conhecidas.*

Havia, entretanto, uma grande diferença na explicação envolvendo o modo pelo qual essas forças poderiam exercer suas ações sobre os diferentes corpos. A gravitação era pensada, desde Newton, como uma força instantânea, isto é, exibindo sua presença nas regiões mais longínquas, nos domínios intermináveis do Universo, como se possuísse uma velocidade “infinita” para sua ação. A força eletromagnética parecia totalmente distinta.

Michael Faraday e seus contemporâneos elaboraram a fantástica noção de campos de força, que iria constituir o paradigma moderno de toda forma de interação entre dois corpos quaisquer. Esse modo novo, chamado “de campo” proposto na descrição das forças eletromagnéticas, supõe a existência de uma ação contígua no espaço e no tempo de tal modo que um movimento contínuo exercido por um agente do campo se propaga a partir de uma fonte geradora de uma força eletromagnética.

Contrariamente à gravitacional, a força eletromagnética não é exercida sobre e por qualquer corpo. Para interagir dessa forma, um corpo material deve possuir uma qualidade especial, particular, intrínseca, que se chamou “carga elétrica”. Esta carga desempenharia um papel análogo, na força eletromagnética, àquele assumido pela massa, na força newtoniana gravitacional.

Por que alguns corpos possuem carga elétrica e outros não, os físicos não sabem. Trata-se de uma constatação, da observação

* A situação é a mesma na física moderna: ainda hoje, somente essas duas forças possuem longo alcance (ou, como se costuma dizer, alcance infinito).

continuada e jamais violada de que, para exercer uma força eletromagnética, um corpo deve possuir essa qualidade especial, a *carga elétrica*. O valor dessa carga vai determinar a intensidade do campo por ela gerada. Quanto maior a carga, maior a intensidade de campo, mais forte a ação eletromagnética. Tudo se passa como se cada corpo carregado produzisse em sua volta um estado de tensão ou campo de forças — apto a exercer sua influência sobre corpos carregados — que seria tanto maior quanto mais próximo da carga. Curiosamente, a intensidade do campo eletromagnético varia inversamente com a distância, de modo semelhante à interação gravitacional.

No final do século XIX, ficou claro que um corpo carregado cria em sua volta um estado de tensão que se propaga com velocidade finita. Essa velocidade associada ao processo de interação constituía a principal diferença entre o eletromagnetismo e a gravitação. Essas duas visões do mecanismo pelo qual ocorre uma interação são irreconciliáveis, e a necessidade de escolher entre um ou outro modo passou a ser o grande problema a ser resolvido.

A observação permitiu decidir entre essas duas formulações formais quando se descobriu que se deveria aceitar a velocidade da luz (no vácuo) como absoluta e máxima para qualquer forma de propagação. A partir desse momento, não era mais possível considerar que a formulação newtoniana representava a força gravitacional e sua velocidade de propagação infinita.

Alguns anos antes de construir uma nova teoria da gravitação, Einstein realizou um trabalho formidável de síntese no que chamou de teoria da relatividade especial, envolvendo algumas questões que, no final do século XIX, haviam colocado em contradição a mecânica e o eletromagnetismo. Em sua teoria, publicou a fórmula que lhe angariou enorme fama, ao afirmar que, embora energia e matéria pudessem ter configurações distintas e múltiplas, elas poderiam ser entendidas de modo unificado. A

fórmula $E = Mc^2$ permite quantificar a energia máxima possível de se obter a partir de um corpo material de massa M .*

A identificação entre matéria e energia permitiu estender a lei de Newton não somente a corpos materiais (uma maçã, um planeta), mas também a energias (como, por exemplo, a radiação eletromagnética constituída por fótons, os grãos elementares da luz). A observação do eclipse solar em Sobral, no Ceará, em 29 de maio de 1919, permitiu comprovar que a luz também sofre atração gravitacional. Quando a luz passa na vizinhança de um corpo massivo, como o Sol, por exemplo, ela é desviada de sua trajetória. Esse passo, que conduziu à máxima generalização estabelecendo a universalização da interação gravitacional, permitiu a Einstein pensar a força gravitacional como nada mais que modificações produzidas na geometria do espaço-tempo quadridimensional com o qual descrevemos a localização e os movimentos dos corpos.

c) Teoria da relatividade geral (gravitação)

O caráter universal da força gravitacional propiciou, no século XX, a primeira grande modificação da teoria de Newton, produzida pelo físico alemão Albert Einstein. Com efeito, podemos constatar que todo corpo é atraído por outro corpo qualquer independentemente de suas constituições químicas. Não há forma de matéria e/ou energia imune à ação dessa força. Tudo que existe sofre a interação gravitacional. Talvez o modo mais contundente de nos referirmos a esse caráter universal da gravitação esteja contida na afirmação

“Caio, logo existo!”.**

* Algumas evidências levam a crer que foi Henri Poincaré o primeiro cientista a explicitar a relação entre a massa inercial de um corpo e a energia que lhe pode ser associada.

** M. Novello, *Os jogos da natureza*.

Isso significa que não há qualquer corpo material ou forma de energia que esteja isenta de interação gravitacional. Toda matéria, todo corpo, toda partícula, elementar ou não, toda forma de energia possuem interação gravitacional. Essa propriedade é única, pois a outra força de longo alcance conhecida — a força eletromagnética — não a possui. Com efeito, existem corpos materiais compostos ou elementares — como a partícula chamada neutrino — que podem passar incólumes por uma região onde exista um campo eletromagnético sem que sejam de alguma forma influenciados por ele: esses corpos não possuem interação eletromagnética!

Foi precisamente o caráter universal da força gravitacional que permitiu pensá-la como uma força completamente distinta de todas as outras conhecidas pelos físicos. Posto que tudo que existe sente a ação de um campo de força gravitacional, não seria possível — perguntou-se Einstein — substituir sua descrição por algum tipo de fenômeno associado à natureza do substrato único que permeia toda a matéria e energia, que está em contato íntimo com toda matéria e energia existentes, ou seja, o contínuo espaço-tempo?

Nesse momento Einstein introduziu outro conceito, argumentando que a força gravitacional poderia ser identificada à estrutura da geometria do espaço-tempo. Ato seguinte, foi levado a modificar a teoria então vigente, argumentando que a dinâmica newtoniana é somente uma teoria aproximada, capaz de descrever campos fracos. A nova dinâmica requeria uma relação entre a geometria e o conteúdo material/energético existente na região onde se passa a interação gravitacional.

A teoria da relatividade especial, de 1905, foi o ponto culminante de uma longa aventura do pensamento, unificando a descrição da física, ao fundir o espaço tridimensional ao tempo e formar uma nova unidade chamada estrutura espaço-tempo. A geometria desse espaço-tempo consiste em uma configuração

rígida, imóvel, capaz de servir de arena ou pano de fundo para todos os processos físicos.

Na teoria da relatividade geral, em 1915, Einstein deu um enorme passo ao sugerir que a força gravitacional poderia ser descrita como uma modificação efetiva da geometria do espaço-tempo. As equações dessa teoria relacionam o modo pelo qual dada distribuição de matéria ou energia de qualquer forma determina a geometria do espaço-tempo.

d) Dependência cósmica das leis físicas

Existe uma questão subjacente a toda ciência que pretende estender o domínio de sua aplicação ao Universo. Em geral ela é deixada de lado por constituir uma questão de princípio, mas devemos ao menos informar o leitor de sua existência. Trata-se da extrapolação das leis físicas que conduziu ao que se costuma chamar de “a questão copernicana”.

Traduzida para a cosmologia relativista, ela adquiriu uma formulação estabelecida de modo simples pelo físico inglês sir Paul Dirac: as leis físicas são universais, válidas em qualquer lugar do Universo? Devemos considerar verdade absoluta a hipótese de que as leis físicas são independentes do espaço e do tempo? As diferentes formas de matéria e energia comportam-se de acordo com as mesmas leis em qualquer lugar do Universo?

Sabemos que esse comportamento depende não somente das características da matéria em exame, mas também de sua “circunstância” — que, simplificada, identificaremos aqui com sua vizinhança no espaço-tempo —, daquilo que está em contato com ela. Essa dependência, no entanto, pode ser incorporada às leis físicas que garantem o modo como se modifica a interação entre um dado tipo de matéria e o meio no qual ela se encontra.

Mas não estamos tratando dessa alteração, que é bem conhecida dos cientistas desde longa data e pode ser, de um modo ou de outro, incorporada às leis. Tratamos aqui de outra característica, de difícil acesso observacional: a extrapolação das leis físicas para regiões de características bastante distintas das que estão sob nosso controle observacional. Desse modo, as próprias leis da física poderiam depender do espaço e do tempo.

Há uma linha de investigação que pretende encontrar indícios dessa variação na observação de algumas propriedades especiais do Universo. Não trataremos de tais propostas neste livro, pois isso nos obrigaria a examinar o que chamei de metacosmologia.*

* M. Novello, *Cosmos et contexte*.

4 Uma pergunta malformulada

Depois da descrição do modelo cosmológico de Friedmann, que nos permitiu explicar o significado rigoroso do que se costuma chamar big bang, podemos retomar a questão que nos formulamos no início e repetimos aqui: pode a ciência produzir racionalidade se o Universo for singular? Pode-se construir uma história causal do Universo se o big bang for identificado com o começo de tudo? É possível desenvolver uma ciência do Universo se a hipótese de que houve um começo singular único para tudo que existe for verdadeira?

Estes são os problemas que deveriam estar em foco, no centro de todas as atenções, mas que infelizmente foram deixados de lado. A resposta negativa a todas essas perguntas permite entender por que, no modelo de criação big bang, não é possível desenvolver racionalmente uma ciência completa do Universo. Isso se deve ao fato de que o modelo do átomo primordial exige a identificação de um ponto singular com o momento de criação do Universo: o volume total do espaço tridimensional seria, naquele momento, naquele ponto, estritamente zero.

Por conseguinte, quantidades físicas, como densidade total de energia e matéria, deixariam de ser observáveis, pois assumiriam rigorosamente o valor infinito — que não faz parte do resultado de medida alguma que se possa em princípio realizar. Desse modo, não poderíamos jamais ter acesso a informação alguma sobre o que estaria na origem daquele momento, nem às suas propriedades internas — nem reconhecê-las como tais. O Universo teria

uma origem que não poderia ser descrita racionalmente. Assim, o programa de descrição racional do mundo encontraria uma barreira intransponível.

Seria desejável — e mesmo mais, indispensável — empreender uma análise detalhada das razões que levaram grande parte dos cientistas a limitar suas análises do Universo ao interior de tal fronteira conceitual completamente fechada. Não é minha intenção, contudo, me ocupar aqui dessa questão.

Transformando a questão fundamental da cosmologia em uma questão axiomática

O Departamento de Astrofísica de Oxford vivia uma intensa atividade nos anos 1970, graças principalmente aos esforços e à organização do professor Dennis Sciama. Ele havia adquirido posição de destaque no cenário internacional por seus estudos sobre a teoria da gravitação, em particular pelas análises afeitas no interior da relatividade geral, examinando diversos fenômenos tratados pela astrofísica.

Entretanto, sua fama maior seria outorgada pela excelência de seus alunos e colaboradores, um grupo seleto formado por cientistas extremamente competentes e inovadores que revolucionaram o estudo da astronomia no Ocidente, desenvolvendo enormemente a cosmologia e a astrofísica relativista. A lista deles, embora pequena, é sem dúvida notável. A maior parte é desconhecida do grande público, exceto por alguns poucos que, por diferentes razões, ganharam notoriedade internacional para além do círculo de cientistas, como o matemático Roger Penrose, o astrofísico Wolfgang Rindler e o físico Stephen Hawking.

Numa noite de janeiro de 1972 fui convidado pelo professor Dennis Sciama — então meu orientador — para uma reunião no All Souls College. Essas reuniões ocorriam sem periodicidade e

em geral dependiam de alguns detalhes referentes ao seminário a que assistíamos todas as quintas-feiras. Naquele dia, o seminário fora dado por Roger Penrose, e como nesse período ele morava fora de Oxford, havia decidido passar a noite no clube a que os professores tinham acesso no College.

A reunião — na verdade, nada mais que uma pequena e bastante frugal ceia, em que se servia um vinho quente de qualidade duvidosa — tinha a função explícita de propiciar a continuação dos debates gerados pelo seminário. Todos ali pareciam concordar com a argumentação bastante elegante, concisa e matematicamente bem-estruturada com a qual Roger sintetizara resultados a que cientistas deste grupo e de outros haviam chegado. A tônica, em particular, fora posta sobre os teoremas que matemáticos, como Penrose e Geroch, e físicos, como Hawking e Ellis, haviam demonstrado nos últimos anos. Dennis argumentava, em tom de síntese, que os trabalhos do grupo haviam promovido duas grandes conquistas.

Por um lado, haviam posto por terra a argumentação do grupo de físicos associado ao mais brilhante cientista da União Soviética — Lev Landau —, liderados pelo seu mais antigo e íntimo colaborador, Evgeni Lifshitz. Este afirmara ter mostrado que a solução mais geral das equações que descrevem a gravitação (isto é, a teoria da relatividade geral), e que representaria uma situação genérica, não poderia assumir valor infinito, ou seja, não deveria apresentar forma alguma de singularidade do campo gravitacional.

Se a afirmação de Lifshitz fosse verdadeira, a solução mais geral das equações da teoria da relatividade geral deveria ser regular, bem-comportada, isto é, não deveria conter regiões onde o campo gravitacional pudesse assumir valores maiores que qualquer número real. Como a intensidade do campo gravitacional, nessa teoria, é identificada à curvatura do espaço-tempo, isso significava que a curvatura deveria ser limitada, seu valor não poderia jamais ser infinito.

Por conseguinte, o famoso ponto de singularidade, ou big bang, identificado com o valor zero do volume total do espaço tridimensional que permitia associar ao Universo um momento único de criação, não seria mais que uma particularidade dependente das simetrias, que, por circunstância especial, o Universo poderia ter adquirido. Não seria consequência de uma necessidade formal inerente às equações que descrevem o campo gravitacional. Seria uma curiosa possibilidade, não uma característica genérica que deveria exibir qualquer Universo em que valessem as equações da relatividade geral. O Universo poderia ter tido uma evolução completamente distinta: suas propriedades seriam casuais, não seriam obrigatórias. O Universo é o que é por puro acaso, não por uma obrigatoriedade formal.

Em ostensiva oposição a essa afirmação, segundo os teoremas de Penrose e outros, o ponto singular “de criação” não deveria ser atribuído a uma particularidade especial desse Universo, mas a uma propriedade genérica das equações da relatividade geral. A singularidade, segundo eles, seria inevitável.

Por outro lado, continuava Sciama na exaltação a seus colaboradores, haviam transformado a ideia vaga e especial da criação do Universo como processo único e singular — de onde toda matéria e energia haviam se originado — em um modelo matematicamente coerente, sustentado por uma verdadeira máquina de guerra formal, em que a teoria da relatividade geral atuava como seu principal instrumento.

Essas ideias forneciam um grande apoio formal ao cenário cosmológico big bang, cuja base estava precisamente na geometria proposta pelo cientista russo Alexander Friedmann — que, em 1919, encontrara uma solução das equações da relatividade geral representando o Universo como um processo em expansão a partir de uma singularidade.

A crença geral — que começou a aparecer na ciência anglo-saxã e se espalhou rapidamente por toda a comunidade científica

internacional — era de que se havia conseguido axiomatizar aquela que certamente deveria ser considerada a mais formidável das questões da ciência: a origem do Universo. Os argumentos contidos nos teoremas pareciam tão convincentes que seus aspectos práticos, aquilo que qualquer pessoa sem maiores conhecimentos técnicos específicos poderia inferir, a superficialidade de suas consequências, se alastraram rapidamente, ganhando inúmeros adeptos no interior da comunidade científica e um número maior de seguidores, mais fervorosos ainda, fora dela.

Podemos concluir daí que estavam preenchidas as condições para que o big bang fosse transformado em um mito moderno de criação de tudo que existe. E foi precisamente o que aconteceu: o big bang passou então a ser entendido como a boa descrição do Universo ao longo de toda sua história, a ser visto como uma verdade científica, absoluta e sem possibilidade de questionamento. Afirmava-se nos mais diferentes lugares — de conferências científicas internacionais a programas de rádio e televisão —, que o grupo que produzira os “teoremas” realizara na cosmologia tarefa semelhante à que seus colegas britânicos Alfred North Whitehead e Bertrand Russel haviam produzido no começo do século XX, ao elaborar o caminho que os conduziu a propor a redução da matemática à lógica. Dizia-se que eles haviam conseguido transformar a questão cosmológica em uma questão axiomática no interior de uma dada teoria da gravitação.

Graças ao sucesso dos teoremas da singularidade, as indagações que caberia à cosmologia responder pareciam ter se reduzido a pequenos detalhes, pois sua origem, aquilo que estaria no começo de todo o processo de evolução, já estava bem-estabelecido: a explosão inicial ou big bang!

A eficácia desse método de análise foi tamanha que ainda mais de duas décadas se tornaram necessárias para reduzi-los à sua verdadeira dimensão: cenários matemáticos possíveis no interior de uma dada teoria. Nada mais que isso. Uma leitura crítica dos teo-

remas mostrou que algumas das pré-condições necessárias para sua aplicação não estão presentes nas observações efetuadas no Universo real. As hipóteses de base, que sustentam suas conclusões, não foram confirmadas pelas descrições das propriedades do Universo que os cosmólogos têm elaborado a partir de observações recentes. Em particular, como já dissemos, a aceitação de que o Universo está acelerado elimina completamente uma das hipóteses básicas dos teoremas e serviu como grande estímulo ao status elevado que os modelos de Universo com *bouncing* — com uma fase colapsante anterior à fase atual de expansão — mereceram recentemente. Essa situação colocou os teoremas de singularidade em sua verdadeira dimensão, isto é, como nada mais que uma elegante estrutura matemática que é consequência de uma teoria geométrica da força gravitacional.

Comentários

Somente a título de complementação para os leitores interessados, acrescento aqui um dentre vários exemplos de teoremas da singularidade demonstrados por Penrose, Hawking e outros. Eu o apresentarei não do modo como ele foi estabelecido originalmente e publicado,* mas com uma linguagem menos técnica que todavia não altere a intenção do autor.

a) Teorema

As quatro sentenças abaixo não podem ser simultaneamente verdadeiras:

1. O Universo está em expansão.
2. A energia e a pressão são ambas positivas.

* S. Hawking, “The occurrence of singularities in Cosmology”, p.187.

3. O caminho de um observador pode ser estendido arbitrariamente para o passado.
4. Existe um tempo cósmico global.

Há uma diferença grande entre as duas primeiras e as duas outras. As do primeiro grupo são afirmações que podem ser decididas por observações, experiências efetivamente realizadas; as outras duas constituem sentenças genéricas que extrapolam propriedades locais conhecidas para regimes inatingíveis e estão fora de nosso controle observacional. Vamos examinar um pouco melhor o que cada uma delas está querendo dizer.

A primeira sentença trata da dinâmica do Universo e sua condição de não constituir o sistema estático proposto por Einstein. Há várias observações envolvendo o desvio da frequência da luz vinda das estrelas longínquas que permitem inferir que o Universo está em expansão e que o aumento do volume espacial é um efeito global.

A segunda afirmativa trata das propriedades físicas que a matéria/energia responsável pelo campo gravitacional cósmico deveria satisfazer. Embora não seja aceitável considerar que a densidade de energia é negativa, os físicos conhecem várias situações nas quais a pressão do sistema pode assumir valores não positivos. Em particular, o próprio fluido cósmico introduzido por Einstein por meio da constante cosmológica possui essa propriedade.

A terceira sentença quer dizer que um corpo material qualquer, clássico (isto é, não quântico), não pode ser aniquilado. Ele tem uma persistência que é precisamente o que permite lhe atribuir realidade e duração; ele não pode desaparecer do espaço-tempo.

Quanto à quarta afirmativa, ela é certamente a mais difícil de ser compreendida fora de seu contexto técnico, e quase impossível de ser posta sob julgamento observacional. De um modo simplista, a sentença traduz a certeza do bom senso de que não é possível

voltar ao passado. Eu me dediquei a examiná-la em outro livro,* mas aqui farei alguns comentários para que o leitor possa ter um pouco mais de informação sobre ela.

b) A deformação do tempo

Kurt Gödel, um dos maiores pensadores do século XX, revolucionou a lógica e produziu uma análise tão profunda sobre a questão do tempo na teoria da relatividade que, ainda hoje, passados mais de 50 anos de seu trabalho seminal sobre o Universo em rotação, continua intrigando os cientistas, incapazes de compreender totalmente o alcance de seus comentários a esse respeito.

Em 1950, Gödel foi convidado a participar de uma obra coletiva intitulada *Albert Einstein, Philosopher and Scientist*, na qual cientistas de diversos países reuniam-se para homenagear o criador da teoria da relatividade geral — uma das descobertas mais imaginativas do século XX. Pareceu-lhe natural que a única investigação digna de seu interesse e ao mesmo tempo de uma homenagem a seu grande amigo deveria envolver uma análise da questão temporal. Foi precisamente o que fez. Gödel realizou então um trabalho de fôlego e empreendeu uma crítica tão formidável que, daquela época aos dias atuais, desperta comentários contraditórios, além de suscitar questões que os físicos não conseguiram resolver.

Para entender a extensão da proposta de Gödel, devemos começar por entender o alcance da revolução provocada pela teoria da relatividade restrita, na qual se substituíu o tempo global único que permeava a física clássica (newtoniana) por diferentes tempos, cada qual dependente daquele que descreve um dado fenômeno físico. Essa miríade de tempos, um para cada

* M. Novello, *Máquina do tempo*.

observador, foi construída a partir da constatação de que existe na natureza uma velocidade máxima de propagação de qualquer tipo de informação: a velocidade da luz. Entendemos também de um só golpe por que não vivenciamos em nosso cotidiano esses diferentes tempos e usamos no dia a dia um tempo só, comum a todos nós, como se a verdade científica da diferenciação dos tempos e sua dependência do estado de movimento de cada relógio não devesse ser aplicada em nossa realidade.

Por que podemos proceder assim? Por que podemos ignorar, em nosso cotidiano, a dependência dos relógios em relação às diferentes velocidades de observadores distintos? Pela razão que já comentamos: as velocidades que experimentamos em nosso cotidiano são extremamente pequenas comparadas à velocidade da luz. Por conseguinte, é extremamente pequena a diferença entre esses tempos medidos por observadores — nós — que se movimentam com velocidades convencionais e possíveis sobre nosso planeta.

c) Dialeto newtoniano

Aqui me parece conveniente fazer uma pequena pausa para um comentário genérico envolvendo a física do século XX. Até o fim do século XIX, as verdades científicas que a física exibía pareciam compreensíveis para os não cientistas, o que não ocorreu com as explicações contidas nas mais importantes teorias do século XX. Tanto a teoria da relatividade restrita ou geral quanto a teoria quântica cercaram-se de uma aura quase transcendental junto à *intelligentsia*, pelas dificuldades de compreensão por parte daqueles que não dominam suas formulações. Essa característica tem a mesma origem: essas teorias tratam de situações que não são facilmente observadas no cotidiano.

A física newtoniana lidava com propriedades capazes de ser explicadas por considerações do dia a dia, isto é, envolviam

fenômenos que possuíam baixas velocidades, pequenas pressões, temperaturas não extremamente elevadas — características associadas à dimensão humana.

Por outro lado, a nova física se erguia sobre experiências produzidas, sofisticadas e de difícil acesso. Elas tratavam, por exemplo, do que ocorre quando se atingem velocidades fantasticamente grandes, próximas da velocidade da luz — 300 mil quilômetros por segundo; de corpos extremamente pequenos (da ordem de um átomo ou menores), ou de situações envolvendo estruturas enormes como galáxias, contendo centenas de bilhões de estrelas. Passava-se, assim, de estruturas que envolviam a dimensão humana para muito além ou muito aquém dela.

Costumo chamar essa situação de “a questão do dialeto newtoniano”, querendo com isso explicitar as fronteiras do que tratava a física clássica (até o início do século XX) para a nova física, relativista e quântica, surgida nas primeiras décadas do século passado. Nesse novo território de explicação, fenômenos que parecem impossíveis de realizar no mundo efetivamente ocorrem. Por exemplo, como entender, de modo newtoniano, usando nossa experiência corpórea, sentenças como: para ir de um ponto do espaço a outro, no nível quântico, não é preciso passar por todos os pontos intermediários; embora a cada momento eu caminhe para meu futuro, estou *ipso facto* me aproximando de meu passado.

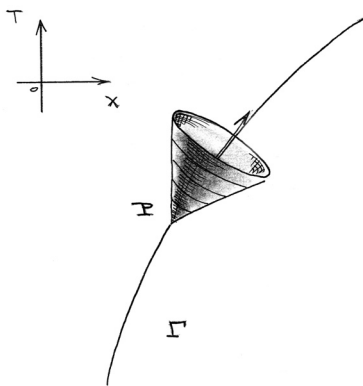
O leitor não acostumado com essas afirmações da física do século XX certamente terá dificuldade de fazê-las entrar em seu sistema lógico, construído com suas experiências próprias em seu cotidiano. Essa dificuldade ocorre porque tais propriedades não são comuns, não são acessíveis em nosso dia a dia. Ao contrário, são propriedades da matéria em circunstâncias muito especiais, a que só podemos ter acesso por meio de um embasamento formal sofisticado — que é no que se transformou a física moderna. E, no entanto, elas formam a teia que sustenta a racionalidade do mundo, e devemos entendê-las como algo constitutivo da realidade que a ciência revela.

d) *Voltar ao passado*

Todos nós, alguma vez em nossa vida, já nos deparamos — quer por curiosidade, quer até por simples jogo ou brincadeira — com a interrogação “por que não podemos viajar ao passado?”. Se fizemos essa pergunta a nossos amigos ou vizinhos, depois de passado o momento dos comentários bem-humorados que a pergunta evoca, todos reconheceremos não saber a resposta.

A ciência, que, até o advento da relatividade geral, tratara desse problema apenas por seu lado formal, lógico, gerando aporias, só conseguiu se manifestar abertamente com Gödel.

O pensador austríaco, de modo inesperado e contundente, ensinou que essa impossibilidade de visita ao passado se explica porque *o campo gravitacional nas vizinhanças da Terra é fraco!* Na verdade, Gödel mostrou, usando para isso a teoria da relatividade geral de Einstein, que se podem encontrar situações “normais”, isto



Trajétória de um corpo material qualquer

O cone representa a propagação da luz. Como a matéria se movimenta com velocidade inferior à da luz, a trajetória do corpo deve passar por dentro deste cone hipotético.

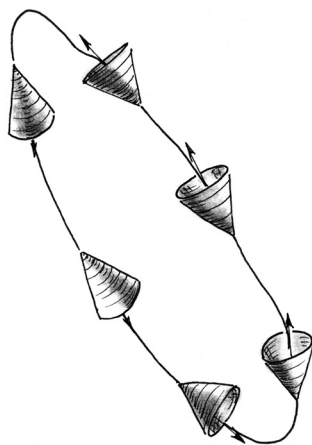
é, que não violam qualquer lei física convencional, nas quais é possível existir caminhos que levem ao passado. Dito de outro modo, caminhos que, contrariamente à nossa intuição e à nossa certeza newtoniana cotidiana, possuem a inesperada propriedade de, ao se avançar para o futuro, não se estaria automaticamente se afastando do passado. Assim, ao caminhar a cada momento para o futuro local, acabaremos por nos aproximar de nosso passado.

Gödel demonstrou que a ideia temporal com que nor-

temos nossas relações cotidianas no mundo não pode ser generalizada para todo o Universo. Haveria a possibilidade de que, em algum lugar no cosmo, o campo gravitacional tornasse possível a existência desses caminhos. A análise de Gödel se baseia na teoria da gravitação de Einstein, que transformou aquilo que entendíamos como “força newtoniana gravitacional” em uma estrutura universal capaz de alterar as propriedades do espaço e do tempo. Como, segundo Einstein, podemos atribuir a estrutura da geometria do espaço-tempo ao conteúdo energético-material nele existente, a própria estrutura causal — pois é disso que estamos falando — está subordinada à força gravitacional.

Ao ser consultado sobre o que pensara do trabalho de Gödel, Einstein teria dito “Não gostei”. Isso é compreensível, pois Gödel colocara em xeque a coerência causal da relatividade geral, bem como a moderna visão da cosmologia relativista, que se baseia fundamentalmente na possibilidade da existência de um tempo global, absoluto, cósmico. A quase totalidade dos cientistas seguiu Einstein naquele comentário de caráter não científico, somente opinativo.

A crítica profunda que Gödel produziu sobre a questão temporal começa aos poucos a despertar os físicos de seu acalanto newtoniano. Estamos sendo levados, inexoravelmente, a examinar, no cenário cosmológico, a questão fundamental que ele apresentou: podemos estabelecer um tempo único global para



Violação da causalidade global no Universo de Gödel
Embora em cada ponto o corpo material viaje dentro do cone de luz (causalidade local), como sua trajetória (no espaço-tempo) é fechada, o viajante anda sempre para o futuro, mas se aproxima de seu passado.

nosso Universo? Os cosmólogos fazem da afirmativa a esta questão um dos pilares do modelo-padrão aceito pelos cientistas.

Mas é possível que, isolado ou não, Gödel, afinal tenha razão: um caminho ao passado não deve ser entendido como uma impossibilidade sustentada por paradoxos lógicos. Sua existência depende das propriedades físicas globais de nosso cosmo e está contida no modo de descrição do Universo que decidimos fazer. Essa questão exige que aprendamos como conciliar os possíveis caminhos ao passado com as convencionais afirmações causais que a ciência faz.

A cosmologia, que tem como tarefa a refundação da física, não pode deixar de lado a questão colocada por Gödel. Alguns cientistas, liderados pelo físico inglês Stephen Hawking, produziram um “princípio de proteção causal” pelo qual, sem qualquer argumentação formal de sustentação, arrogantemente estipulam que, como as curvas ao passado de Gödel não existem em nossa vizinhança, elas também não existem no Universo. Esta solução lembra a adotada pela Rainha Vermelha em *Alice no País das Maravilhas*; quando confrontada com uma questão difícil e cuja solução não lhe parecia acessível, ela declarava: “Vamos mudar de assunto.” Para Gödel a existência ou não de caminhos ao passado é a questão principal da ciência, se ela quer produzir um discurso aberto sobre o tempo referente a todo o Universo. E ela não pode ser decidida por um apriorismo.

Assim, decidiu-se por aceitar que, na descrição do Universo, podemos usar por convenção um tempo gaussiano, global. O matemático alemão Carl Friedrich Gauss mostrou que localmente se pode organizar uma descrição das localizações no espaço e no tempo — o que chamamos de sistema de coordenadas — tal que, em uma dada região do espaço-tempo, é possível definir um tempo único, comum para um conjunto de observadores. Trata-se de uma simples escolha particular de descrição e que não implica consideração alguma sobre as características do mundo.

Assim como o mapa não é o território, um sistema de coordenadas não passa de uma convenção que nos permite fazer referência a acontecimentos que ocorrem em um dado lugar em certo tempo. Os valores numéricos a que nos referimos para caracterizar espacial e temporalmente um evento, qualquer ocorrência, nada mais são que convenções feitas para que, de modo eficiente e prático, diferentes observadores possam trocar informações a respeito do mundo físico.

Desde o maravilhoso modo pelo qual Friedmann havia elaborado um modelo cosmológico dinâmico, pareceu a todos que essa caracterização por meio de um tempo único global gaussiano — introduzido pelos pais fundadores da cosmologia moderna, aproximando o máximo possível a descrição contemporânea do Universo ao modo newtoniano clássico — era perfeitamente natural, matematicamente justificável para se construírem modelos de Universo, soluções exatas das equações da relatividade geral.

Gödel rompeu com essa tradição argumentando que campos gravitacionais possuindo como fonte da curvatura do espaço-tempo fluidos materiais dotados de rotação, essa caracterização gaussiana deveria ser revista. E, ao exibir seu modelo cosmológico, comprovou formalmente que tinha razão, embora sua solução não seja um bom modelo para o Universo.

e) Sobre Gödel

Gödel era fascinado pela rotação. Recentemente, em uma visita ao Instituto de Cosmologia e Astrofísica de Pescara, à beira do Adriático, um físico italiano que vivera em Princeton à época de Gödel confidenciou-me que, anos depois da descoberta do famoso Universo em rotação, foi procurá-lo em seu gabinete de trabalho no prestigioso Institute for Advanced Studies. Teve então a curiosidade de aproveitar aquele momento único que

Gödel lhe concedera — um diálogo com uma figura tão isolada e fechada sobre si constitui certamente um evento raro — a fim de lhe perguntar de onde teria ele tirado a inspiração para pensar aquele Universo girante com características tão excepcionais, tão diferente de tudo que até então (e mesmo depois!) os cosmólogos haviam produzido. Gödel, sem um momento de hesitação, teria lhe mostrado a janela (na verdade, uma pequeníssima fresta de janela por onde, naquele entardecer, os últimos raios do Sol conseguiam a duras penas atingir o escuro interior de sua sala de trabalho) e, apontando para o pátio, lhe perguntou: “Você pode me mostrar aí fora algo que *não* esteja girando?”

À semelhança de certos artistas, como o pintor Van Gogh, que parecem ver o mundo como um processo mágico, em que cada ponto de observação, cada evento cotidiano, cada processo de reflexão de luz se deixa descrever como uma fonte de energia que é irradiada permanente e continuamente — minúsculas reproduções de inumeráveis estrelas como o Sol —, Gödel via a natureza como sequência maravilhosa de processos em permanente movimento, que não permanecem em linha reta, exibindo-lhe o que ele descrevia como ininterrupta rotação.

Possivelmente a genialidade dele estava menos em pensar situações inesperadas e pouco comuns, e mais em deixar-se levar pela exuberância implícita ou explícita que cada acontecimento, cada mínimo movimento que chega até nós possui; e em usar essa percepção para elaborar uma representação da realidade. Mesmo que, à primeira vista, ela parecesse afastada de qualquer evidência direta ou indireta de observação, parecendo não obedecer às leis convencionais da física. Por mais estranha, inusitada e esdrúxula que pudesse parecer aos outros cientistas e não cientistas, essa representação do mundo, esses momentos ininterruptos de criação, lhe permitia produzir um cenário incomum do Universo. Embora o cenário pareça ter seu ponto fundamental de apoio em fantasias formais, na verdade ele reside em cânones reconhe-

cidos — que a ciência não consegue mostrar serem inaplicáveis ao nosso Universo.

O modelo cosmológico de Gödel não parece se adequar ao Universo observável. Entretanto, do ponto de vista de compreensão da teoria da relatividade, ele produziu um aprofundamento inquestionável. Em particular, o modelo de Gödel levou-o a repensar o conceito de tempo de um modo inesperado. Até então, todo o programa da cosmologia, seguindo a recomendação da física, baseava-se, como vimos no modelo-padrão, na aceitação da possibilidade de construir um tempo único, global, capaz de constituir a versão moderna, dentro da teoria da relatividade geral, do tempo absoluto newtoniano.

Gödel escapou dessa armadilha apriorística que todos os cosmólogos aceitam e produziu um cenário cósmico no qual a geometria — gerada por fontes de galáxias em rotação — permite o retorno ao passado. Dito de outro modo, em seu modelo, ao caminharmos em cada ponto para o futuro estaríamos localmente nos afastando de nosso passado, mas, *ipso facto*, nos aproximando globalmente dele. Como se devêssemos trocar a descrição temporal do mundo, de uma estrutura linear para um verdadeiro círculo do tempo.

Além desses méritos indiscutíveis e raros, Gödel tinha idiosincrasias inimagináveis. Um físico italiano descreveu-me que o pânico que Gödel sentia de falar em público não tinha igual na história das personalidades científicas do século XX. Durante muitos anos, enquanto trabalhava no Institute of Advanced Studies em Princeton, raramente aceitava apresentar uma palestra pública ou seminário para mais de duas pessoas.

Por essa conhecida razão, quando finalmente, depois de uma longa negociação, aceitou falar, entende-se o rebuliço que o anúncio de sua palestra provocou — fato raramente visto naquela austera e recatada instituição. No dia da conferência de Gödel — cuja palestra era anunciada como uma síntese da noção de espaço na filosofia de Leibniz —, o anfiteatro estava

totalmente lotado. Na primeira fila viam-se personalidades, cientistas famosos, dentre os quais Albert Einstein. Mesmo em Princeton, conhecida internacionalmente por atrair cientistas e filósofos renomados para a universidade e o instituto, poucas vezes uma conferência despertara tanta curiosidade e atraía tantos ilustres pensadores.

Depois de anunciado e chamado a proferir sua palestra, Gödel caminhou para diante do público, sentou-se na cadeira que lhe haviam reservado, colocou suas notas sobre a mesa e esperou que se fizesse silêncio, o que logo foi estabelecido. Passou-se um tempo, longo demais para alguns da plateia, em que nada acontecia. Assim ficou ele em silêncio durante todo o período reservado ao colóquio. Aos poucos, os cientistas atônitos e sem entender o que acontecia foram se retirando, esvaziando lentamente a sala. Por fim, depois de 40 minutos de pesadíssimo silêncio, Einstein, o último presente, levantou-se com o próprio Gödel, e saíram juntos.

Meu colega italiano pretende explicar a situação inusitada como consequência do insuperável pavor de falar em público de Gödel, o que o levava a procurar, o mais das vezes, o mundo insólito, fechado e indizível que criou.

f) Cenários de Universos eternos dinâmicos

A ideia de Universo cíclico na cosmologia moderna foi examinada formalmente desde os estudos de Richard Tolman, na primeira metade do século XX; e as geometrias que representam cenários dinâmicos não singulares — isto é, sem um início singular em um tempo finito — tiveram suas formas explícitas descritas ao final dos anos 1970. Mas somente no começo do século XXI suas características e principais propriedades começaram a ser examinadas em pé de igualdade com o modelo-padrão big bang. A principal razão para isso se deveu aos teoremas da singularidade que citamos.

Por um lado, a principal lição que se tirou dos *teoremas* foi a existência de uma forma de singularidade em praticamente toda solução da relatividade geral que descreve a evolução da geometria do Universo — pelo menos aquelas que possuem, como fonte, configurações extremamente simples e idealizadas, em geral associadas a um fluido perfeito. Por outro lado, eles explicitaram modos formais graças aos quais se podem gerar geometrias que representam universos não singulares.

Essas geometrias possuem ou uma expansão que se estenderia lentamente por um tempo infinito, ou um estágio de colapso representando uma fase de contração anterior à atual fase de expansão. Tais cenários eternos, dinâmicos, possuem o que se chama de *bouncing*, isto é, um valor mínimo para seu volume. Eles passam de uma fase de contração a outra, de expansão, possuindo momento de ricochete e podendo repetir essa configuração — semelhante a um processo de sístole-diástole — mais de uma vez. A existência de um valor mínimo para seu “raio” produz de imediato uma série de novidades e abre caminho para uma nova visão sobre os mecanismos em ação no Universo. É sobre esses mecanismos e propriedades novas que a presença do raio mínimo provoca que os cosmólogos têm se dedicado intensamente nos últimos anos.

5 O programa do Universo eterno

Não é raro que uma proposta científica relevante seja precipitadamente posta de lado, ou mesmo rejeitada como ineficiente, graças ao mau uso de uma de suas características ou à aplicação equivocada de uma formulação teórica particular que lhe esteja associada. É possível encontrar vários exemplos dessa situação em diferentes áreas da física e mesmo em outras ciências. Um caso notável ocorreu na história da cosmologia.

Durante a década de 1950, duas teorias rivais eram entendidas como alternativas possíveis para descrever o Universo em suas propriedades globais: o cenário explosivo e singular descrito pelo big bang e o cenário *steady state*, no qual a configuração do Universo é estacionária, semelhante à geometria especial descoberta em 1917 por Willem de Sitter. Nas duas décadas seguintes, partidários de uma ou outra dessas propostas de história do cosmo e de sua possível origem dedicaram enorme esforço na tentativa de encontrar argumentos capazes de mostrar que a teoria rival estava errada.

Como vimos antes, em 1964, dois radioastrônomos americanos seguindo a orientação do físico Robert Dicke, interpretaram a observação de uma radiação cósmica altamente isotrópica como sinal de que havia no Universo, homogeneamente distribuído, um mar de fótons em equilíbrio termodinâmico — semelhante a um corpo negro a uma temperatura de $2,7^\circ$ Kelvin. A explicação natural desse fenômeno passava pela aceitação de que o Universo fora bastante mais quente e concentrado no passado.

A interpretação foi bem-aceita pela comunidade internacional, que ficou então convencida de que o Universo era um processo dinâmico e que sua configuração deveria variar, de modo não uniforme, com o passar dos tempos. No final daquela década, parecia claro para boa parte dos cosmólogos que o modelo do Universo em estado estacionário — proposto pela teoria *steady state* —, defendida principalmente pelo astrônomo inglês Fred Hoyle e seu colega hindu Jayant Narlikar, não era apoiado pelas observações astronômicas. Concluiu-se então — precipitada e, como veremos, erroneamente — que nosso Universo deveria ter tido um começo singular há cerca de poucos bilhões de anos.

Em verdade, a conclusão correta deveria ter se limitado a rejeitar os cenários cosmológicos que não incluíam em sua explicação a evolução dinâmica do Universo, em particular a versão da proposta *steady state*. Nada mais que isso!

Entretanto, como uma dicotomia envolvendo os dois exemplos de descrição dos primórdios do Universo havia se instalado perante a comunidade científica, a demonstração de que uma delas estava em desacordo com as observações astronômicas deu automaticamente à sua rival a condição de verdadeira.

A principal questão em jogo na disputa, *steady state versus big bang*, e que ficara relegada a segundo plano na querela, foi imediatamente abandonada e esquecida. O que realmente estava por trás da discussão e constituía sua razão de ser era a tentativa de responder à questão fundamental: o Universo teve um começo há poucos bilhões de anos ou é eterno? O *steady state* certamente é um caso muito especial de Universo eterno isento de uma verdadeira dinâmica, posto que sua aparência, segundo essa concepção, seria independente do tempo cósmico.

Tal propriedade não deveria ter sido entendida como se, além do modelo *steady state*, não houvesse qualquer alternativa disponível. Com efeito, pois o que efetivamente se observou em 1964, e corroborou-se em outras observações desde então, se resume

somente à constatação de que o Universo é um processo e que seu volume foi menor no passado. Nada mais que isso. Deveríamos então perguntar: é possível encontrar outro cenário, mais realista que o modelo *steady state* estacionário e que seja igualmente eterno? A resposta é sim, como veremos.

***Steady state*: a batalha perdida**

Um dos maiores obstáculos à propagação da ideia de que nosso Universo não teve um momento de criação há poucos bilhões de anos está ligada ao sucesso efêmero da proposta do cenário *steady state*. Durante alguns anos esse modelo foi considerado uma boa alternativa ao big bang, ao sustentar a ideia de que o Universo não teria tido um começo.

Tanto a formulação inicial quanto a evolução ulterior desse modelo, contudo, apoiaram-se fortemente em propriedades *a priori*. Nesse aspecto, ele tem origem semelhante ao modo pelo qual Einstein inaugurou, em 1917, a cosmologia moderna: estabelecendo propriedades globais do Universo a partir de princípios gerais, organizando a base de seu cenário a partir de preconceitos sobre como o Universo deveria ser. O principal obstáculo ao *steady state* está ligado ao modo como esse modelo trata a dinâmica que controlaria a evolução do Universo.

Para entender isso, devemos lembrar o que foi comentado anteriormente sobre o modelo de Friedmann: “As observações parecem demonstrar que, em grandes dimensões, o espaço tridimensional é homogêneo.” Essa característica adquiriu uma formulação simplificada na expressão *geography does not matter* (“a geografia não importa”). Ou seja, se pudéssemos tirar uma fotografia da totalidade espacial do Universo em um dado tempo — digamos, hoje —, perceberíamos que as propriedades exibidas por suas diferentes partes são as mesmas,

isto é, qualquer região da foto que examinemos mostrará as mesmas características.

Assim, como não existe um lugar privilegiado no Universo, se considerarmos um ponto qualquer como lugar de observação, iremos notar que, em torno dele, as propriedades globais — como, por exemplo, a densidade de galáxias — independem da distância em relação a esse ponto arbitrariamente tomado como central. Em outras palavras, o espaço tridimensional é homogêneo. Daí a expressão popular pela qual a geografia do Universo não permite reconhecer ponto especial algum, ou, de modo simbólico, a expressão usada pelos cosmólogos: “A geografia não tem importância cósmica.”

Essa homogeneidade espacial do Universo é um dos pilares do modelo-padrão da cosmologia. Todos os modelos cosmológicos citados anteriormente foram construídos a partir dessa propriedade. Em um primeiro momento, como no caso dos modelos pioneiros de Einstein e Friedmann, eles se estruturaram apenas por simplificação formal, permitindo encontrar soluções exatas das equações da relatividade geral e dando-lhe o status de modelo cosmológico. Mais tarde, nas últimas três décadas do século XX, foram construídos com o apoio observacional.

Princípio cosmológico perfeito

A simplificação formal que admite *a priori* a homogeneidade espacial (“a geografia não importa”) foi chamada pelos pais fundadores da cosmologia relativista de princípio cosmológico. Ele desempenhou um importante papel na consolidação do modelo-padrão. Alguns cientistas propuseram uma generalização desse princípio de tal modo que a configuração do Universo fosse a mesma não somente em um dado tempo, mas para todos os tempos. Essa

proposta de homogeneidade temporal ficou caracterizada pela expressão *history does not matter* (“a história não importa”).

Esses cientistas argumentaram que não existe uma verdadeira dinâmica no Universo, uma vez que todo observador veria a mesma estrutura global. Sua configuração permaneceria para sempre inalterada. Quando, a partir da segunda metade dos anos 1960, começou a ficar claro para a comunidade científica que o Universo era um processo, que suas características variavam com o tempo e que havia diferenças sensíveis entre o presente e o passado, o cenário *steady state* começou a ser severamente criticado, e hoje está praticamente abandonado.*

A derrota de um cenário cosmológico isento de singularidade e, em sentido rigoroso, eterno foi a principal responsável pela atitude dos cientistas que deixaram de lado outros modelos de Universo sem singularidade. Podemos dizer que o fracasso primeiro do *steady state* funcionou como verdadeiro bode expiatório de todos os demais cenários eternos.

Ainda hoje, passados mais de 40 anos, alguns cosmólogos, ao comentar para o grande público a relação entre os modelos singulares e não singulares, cometem a confusão que leva à visão incorreta de que criticar o big bang significa voltar ao cenário estático do modelo *steady state*. Na verdade, trata-se de conciliar os dois e produzir um cenário realista de um Universo dinâmico e eterno, sem as dificuldades apontadas de um Universo singular.

* Essa versão do desenvolvimento da cosmologia é apenas uma parte da verdadeira história. Isso porque, alguns dos principais defensores do cenário estacionário — como meu amigo, o professor Jayant Narlikar — ainda hoje têm severas críticas à argumentação que a maioria dos cosmólogos desenvolveu e que levou à rejeição do *steady state*.

6 A expansão acelerada do Universo, ou em busca de novas formas de energia

Talvez o ano de 1998 possa ser identificado como aquele em que se produziram as condições de aceitação, por parte da comunidade de cosmólogos, da proposta do Universo eterno. O que provocou essa mudança? Em 1998, observações efetuadas em certos tipos de estrelas (supernovas) levaram à proposta — imediatamente aceita pela maioria dos cientistas envolvidos — de que o Universo estaria sendo acelerado. Essa conclusão, mesmo que provisória, criou uma dificuldade enorme, incapaz de ser conciliada com o modelo-padrão da cosmologia.

Desde os anos 1930, sabe-se que o Universo está em expansão. Em meados da década de 1960, os cientistas tiveram a confirmação definitiva dessa característica graças à identificação de uma radiação cósmica de fundo.* Estabeleceu-se assim o cenário cosmológico-padrão no qual o Universo é projetado na realidade por um mecanismo singular inacessível e, a partir daí, tem seu volume total aumentado de modo desacelerado. Essa desaceleração é compreensível, pois ela pode ser identificada ao caráter atrativo da força gravitacional. A matéria-energia contida no Universo freia a expansão produzida pela suposta explosão inicial, de origem desconhecida nesse modelo.**

* Para os antecedentes dessa observação em 1941, ver Apêndice II, “Cronologia comentada da cosmologia”.

** Certamente no modelo big bang ela estaria associada a uma ação antigravitacional.

A possibilidade de que o Universo esteja sendo acelerado* produziu uma verdadeira revolução nas ideias que sustentavam o modelo big bang, pois significava — em linhas gerais — que sua descrição do conteúdo material do Universo estava errada ou, na melhor das hipóteses, incompleta.

A razão para essa conclusão está ligada às hipóteses adotadas por esse modelo, pressupondo que a relatividade geral é a boa teoria da gravitação e que a fonte de curvatura do espaço-tempo é um fluido perfeito. Aqui acontece uma catástrofe teórica, pois, no interior desse quadro formal, a aceleração do Universo só é possível se a pressão for negativa. E ainda mais, ela teria de ser muito negativa. Para ser rigoroso, isso significa que a pressão deveria ser, em valor absoluto, pelo menos três vezes maior que a densidade de energia correspondente. Há duas possibilidades para isso: uma configuração material que se pode atribuir a alguma propriedade nova ainda desconhecida; ou aceitar que nosso conhecimento da interação gravitacional está errado.

Entre substituir a equação de Einstein ou admitir que o fluido cósmico tenha uma característica muito especial, desconhecida até então, os cientistas escolheram a segunda opção.

Aceitou-se assim que a aceleração do Universo deveria estar associada a uma fonte de curvatura do espaço-tempo constituída por algum novo tipo de matéria ou energia que admite a interpretação em termos de um fluido perfeito, descrito por uma densidade de energia E e pressão P negativa, onde a equação de estado $P = s E$ é tal que seu triplo $3s$ é menor do que -1 ($3s < -1$). Essa substância recebeu o nome de *energia escura*. Ela não seria identificável a forma alguma de matéria-energia conhecida nem facilmente

* É importante ressaltar que essa aceleração global do Universo não foi completamente confirmada. Existe uma explicação alternativa para as observações que não implica essa expansão acelerada. Ver a intervenção de David Wiltshire no “Marcel Grossman Meeting”, julho de 2009.

observável — a não ser indiretamente, pelo comportamento de aceleração da expansão do Universo.

Ora, como já vimos, a relação que envolve a energia e a pressão é precisamente a propriedade necessária para a violação das condições de energia que haviam sido postuladas como naturais e que tinham sido utilizadas para demonstrar os teoremas de singularidade.

Por conseguinte, a nova constituição material possui propriedades semelhantes àsquelas necessárias para evitar um colapso gravitacional de uma fase em contração para produzir um *bouncing*. As condições para ir além do big bang e produzir um Universo eterno passaram a ser aceitas, pois não seria mais possível usar as restrições dos teoremas de singularidade — posto que as condições de sua aplicação ao nosso Universo não seriam preenchidas.*

Conclui-se daí que os argumentos apresentados na utilização dos teoremas de singularidade como apoio formal incontestado ao modelo big bang durante as últimas décadas do século XX, se mostraram — para dizer o mínimo — precipitados.**

A energia escura: novos campos no Universo?

Para gerar um exemplo concreto do cenário acelerado, postulou-se a existência de uma estrutura material identificada com um campo escalar possuindo propriedades muito particulares.

* Independentemente da confirmação ou não da aceleração do Universo, ela já preencheu uma função notável, retirando da mente dos astrofísicos os preconceitos associados aos teoremas de singularidade e, consequentemente, abrindo caminho para que o cenário eterno pudesse ser completamente aceito.

** É importante observar que essa energia escura pode estar relacionada a quantidades físicas conhecidas, como no caso de o Universo ser controlado por campos magnéticos não lineares (Ver M. Novello e S. Bergliaffa).

A física quântica de tal modo transformou a ideia de corpos materiais que foi possível associar a cada partícula um campo. Perdeu-se assim a característica localizada de um corpo clássico, ganhando-se uma extensão no espaço-tempo. Esses campos possuem diferentes propriedades. Não entraremos aqui no exame dessa questão, mas, para entender um pouco melhor o discurso que se pode fazer sobre as estruturas materiais no Universo, farei um comentário a respeito de uma espécie particular de campo chamado escalar.

Na verdade, não existe somente um campo escalar, mas uma classe de campo deste tipo. O termo escalar está associado ao fato de que, para caracterizar cada um desses campos, é suficiente uma só função. Em contrapartida, os demais campos materiais de que a física trata exigem, para sua caracterização, várias funções: seu número depende dos diferentes tipos de matéria.

Exemplo notável de campo escalar é o méson-pi, descoberto pelo físico brasileiro César Lattes e seu colaborador italiano Giuseppe Occhialini. Entretanto, o campo escalar que se procura na cosmologia é de outra natureza. Ele não possui massa, o que torna sua detecção em laboratório terrestre muito difícil. Sua possibilidade de existência vem sendo intensamente examinada em termos globais, nas últimas duas décadas, em particular na questão da aceleração do Universo.*

Outras formas de matéria poderiam estar presentes no mecanismo de aceleração. Programas complexos envolvendo grupos internacionais de cientistas lançaram-se à busca da explicação para essas novas fontes de energia. No momento em que escrevo este livro, não se pode afirmar, dentre as diferentes formas

* No começo dos anos 1980, propôs-se um campo escalar — denominado inflaton — para explicar o mecanismo chamado de inflação, usado para solucionar algumas questões causais de difícil compreensão no cenário-padrão da cosmologia. Ainda hoje, no entanto, esse inflaton não foi observado.

de energia examinadas, qual deve ser identificada com a chamada *energia escura* e reconhecida como a verdadeira responsável pela aceleração do Universo. Assim, inúmeras possibilidades são analisadas e postas em debate pelos cientistas. Portanto, quando o cosmólogo vem a público, ao ser indagado qual delas é a verdadeira, responderá do único modo aceitável nos dias atuais: *não sabemos*. E, com o otimismo que a história da ciência lhe permite, poderá acrescentar: *ainda*.

7 Diferentes modelos de big bang, diferentes modelos de Universo eterno

Assim como não existe um modelo único de big bang,* também há vários candidatos a representar um Universo eterno. Essas múltiplas possibilidades não devem nos assustar, pois o que nos interessa aqui é a distinção bem nítida entre as duas classes: Universo tipo big bang e Universo eterno. As diferenças no interior das classes são detalhes técnicos ligados às características específicas de cada modelo — e não é nosso propósito desenvolvê-las aqui.

Ao longo dos últimos anos, apresentaram-se várias propostas de modelos sem singularidade. Neles, as causas da ausência de um ponto singular na história da evolução do Universo têm diferentes origens. Entre as mais estudadas estão as seguintes:

1. Mudança nas equações da dinâmica do campo gravitacional.
2. Universo magnético.
3. Quantização do campo gravitacional.
4. Novas formas de matéria.

Somente para dar uma ideia de como elas geram cenários sem singularidade constituindo um Universo eterno, vamos nos concentrar em uma delas, o Universo magnético.

* No Glossário explica-se essa multiplicidade.

Universo magnético

O eletromagnetismo deve seu enorme sucesso — não somente formal, teórico, mas também e principalmente o sucesso de assumir papel importante na física moderna e na tecnologia a ela associada — ao fato de que ele se estabeleceu como uma teoria linear. Isso significou a possibilidade de realização de um grande número de fenômenos previstos por essa teoria — praticamente todos os sistemas de comunicação desenvolvidos no século XX — bem como uma enorme simplicidade formal. Foi essa característica que permitiu à linearidade do eletromagnetismo* impor-se como paradigma, servindo como guia de todas as teorias de campo posteriormente desenvolvidas.

Entretanto, a linearidade — fartamente corroborada pela observação em situações de campo as mais diversas — deve dar lugar a processos não lineares quando se é obrigado a examinar eventos de natureza quântica ou quando estão em jogo campos extraordinariamente intensos. Além disso, a não linearidade pode aparecer também em regiões onde a curvatura do espaço-tempo é grande, isto é, onde o campo gravitacional é muito intenso, como ocorre em regiões localizadas na vizinhança de buracos negros, ou em grandes dimensões de espaço-tempo, como na cosmologia. No caso linear, os campos eletromagnéticos são descritos por mensageiros fundamentais, chamados fótons. No caso não linear iremos chamar os mensageiros correspondentes, por abuso de linguagem, de fótons não lineares.

É precisamente nessas circunstâncias, em que se deve levar em conta a combinação da relatividade geral com a eletrodinâmica não linear, que aparecem cenários cosmológicos contendo um *bouncing*.

* A teoria linear foi estabelecida por James Clerk Maxwell, no século XIX.

Nos últimos anos vários cientistas* sugeriram um cenário unificado no qual a não linearidade do fóton estaria por trás da solução de duas das questões mais fundamentais da cosmologia, a saber: a singularidade inicial e a aceleração do Universo. Para ser capaz de interferir nessas duas questões, as forças eletromagnéticas deveriam se afastar da linearidade em dois setores distintos, isto é, naquelas regiões onde o campo é muito forte (quando a densidade de energia é extremamente elevada) e na região oposta, quando o campo é extremamente fraco.

Para simplificar nossa exposição, consideramos a configuração em que, ao efetuar-se a média sobre todas as configurações do campo possíveis, somente existe o campo magnético. Associado a leis de conservação, o campo magnético varia, com o passar do tempo, como uma função quadraticamente inversa do fator de escala do Universo. Assim, quando o Universo está altamente condensado, essa função, que chamamos de raio do Universo, é extremamente pequena. No extremo oposto, na situação atual, o raio é grande. Em ambos os casos, a intensidade do campo é grande, dependendo da forma de sua não linearidade e de ser dominante nestes dois momentos do Universo: quando ele está muito condensado e, no extremo oposto, quando ele está bastante diluído.

Assim, a partir da autointeração de campos magnéticos não lineares com a gravitação, foi possível gerar um modelo de Universo do tipo eterno com *bouncing*. Este modelo, como outros cenários que possuem uma fase colapsante anterior à atual expansão, provoca características especiais do Universo que podem servir como sinais que o identificam. Dentre esses sinais, particular ênfase vem sendo dada, nos últimos anos, ao exame das estruturas materiais observadas sob forma de galáxias e aglomerados de galáxias. Nessas configurações materiais, no

* Uma lista completa é apresentada em M. Novello e S. Bergliaffa.

interior dessas estruturas não homogêneas, o Universo esconde a informação daquele período colapsante. A investigação dos modos pelos quais se estabeleceu a distribuição de matéria no Universo irá revelar este mistério e, com ele, o mecanismo que deu origem à atual fase de expansão.

Comentários

a) Singularidade no eletromagnetismo clássico

A utilização da teoria linear do eletromagnetismo de Maxwell provocou, no início do século XX, uma dificuldade semelhante à que estamos considerando no caso do campo gravitacional. Quanto à teoria de Maxwell, havia o seguinte problema formal: consideremos uma partícula carregada estável, como o elétron, representada como se fosse uma partícula sem estrutura, puntiforme; sabemos, pelas equações de Maxwell, como calcular o campo gerado por uma carga livre. Ao calcularmos o campo eletromagnético desse elétron ao longo de sua linha de universo, isto é, de sua trajetória no espaço-tempo, percebemos que esse campo diverge, assume valores para além de qualquer número finito.

Para eliminar essa desagradável situação, diferentes propostas foram examinadas. Já na década de 1920, o cientista britânico Paul Dirac e os brasileiros Mario Schoenberg e José Leite Lopes consideraram que sobre o elétron deveriam atuar não somente os efeitos dos campos eletromagnéticos retardados, como mandava a causalidade, mas também efeitos de campos avançados.

Longo e demorado debate se estabeleceu desde então, e ainda hoje se examinam propostas distintas para eliminar a singularidade, em particular por meio de processos não lineares que modificam a dinâmica de Maxwell. Entretanto, a maioria dos físicos aceita que a dificuldade deixa de existir quando se

consideram efeitos de natureza quântica, pela aplicação de uma versão das relações de incerteza de Heisenberg. Assim, embora o problema original não seja resolvido, pelo menos a física quântica permite transcendê-lo.

A questão da singularidade do elétron puntiforme deixou de ser um problema. Ademais, há um modo tecnicamente mais simples de resolvê-la: admitir que o elétron não está sozinho no Universo, que ele não é um sistema único, e deve ser pensado na prática como imerso em um meio, o seu *environment*. Assim, mesmo que a teoria eletromagnética tenha dificuldades ou, mais do que isso, seja incompetente para produzir uma teoria isenta de dificuldades formais, de singularidades, pode-se argumentar que tal coerência seria difícil de ser construída, mesmo para uma partícula isolada, se eliminássemos o seu exterior, seu contato com o resto do mundo.

Nada semelhante ocorre com o Universo. A singularidade do modelo de Friedmann não pode ser eliminada invocando-se um “meio externo”, a menos que se esteja disposto a considerar que a palavra “Universo” se refere a um sistema físico convencional, e não à totalidade do que existe. Nos últimos anos, essa ideia aparentemente esdrúxula tem aparecido aqui e ali entre os físicos, em meio aos quais algumas teorias são estabelecidas fazendo apelo a dimensões superiores, especulando sobre a existência de processos físicos em dimensões extras.

b) Buraco negro não gravitacional

Processos de natureza quântica certamente implicam mecanismos de autointeração. Entretanto, mesmo no nível clássico, as observações não impedem a análise de processos não maxwellianos envolvendo não linearidade. Ademais, tais processos são mesmo esperados quando se levam em consideração fenômenos envolvendo a gravitação. Dentre as várias propriedades novas que os processos não lineares aportam, uma é particularmente significati-

va e possui consequências formais dignas de serem mencionadas. Trata-se da velocidade de propagação das correspondentes ondas eletromagnéticas.

Recentemente, estudos dessa questão colocaram em evidência uma característica notável: contrariamente ao que ocorre na teoria linear de Maxwell, a não linearidade provoca uma dependência da velocidade dos fótons com o campo. Ora, a teoria da relatividade especial se baseou precisamente na independência da velocidade dos fótons para reestruturar o espaço e o tempo absolutos newtonianos. Segue-se então que a não linearidade põe em questão alguns dos principais fundamentos da estrutura do espaço-tempo que a relatividade especial havia organizado.

Com efeito, mostrou-se que a não linearidade provoca uma modificação da geometria do espaço-tempo. Mas essa alteração das propriedades geométricas do espaço-tempo existe somente para os fótons. Tudo se passa como se os fótons agissem em presença de uma curvatura de origem puramente eletromagnética. Só para citar uma *consequência notável* dessa propriedade, foi possível mostrar que, em certas configurações não lineares, a luz pode se comportar como se estivesse em presença de um buraco negro não gravitacional.

É assim que se chama uma configuração que impede os fótons de saírem de uma região compacta por um mecanismo semelhante ao de um buraco negro. A distinção entre o buraco negro eletromagnético e o buraco negro gravitacional é que, no primeiro caso, a força responsável por aprisionar os fótons é a eletromagnética.

c) O primeiro exemplo (1979) de um cenário do Universo eterno dinâmico

A ideia de que o Universo poderia ter tido uma duração bem maior do que aquela prevista no cenário big bang não é recente. Vários

cientistas discutiram a proposta de que uma singularidade inicial — separada de nós por poucos bilhões de anos — poderia não ser uma necessidade das equações que descrevem a gravitação — a força responsável pelas propriedades globais.

Entretanto, essas ideias eram gerais, vagas, não apresentavam uma forma específica da geometria do mundo. Por conseguinte, era quase impossível submetê-las à prova da observação, pois não faziam previsões passíveis de serem testadas. Somente em 1979* foi proposta uma solução analítica das equações cósmicas representando um Universo eterno, com uma geometria bem-definida e sem singularidade.**

d) Fótons e grávitons: eletrodinâmica e gravitação

Existem 100 milhões de fótons para cada átomo de hidrogênio presente no Universo. No entanto, esse número fantasticamente grande não implica necessariamente que a eletrodinâmica seja a principal responsável pelas alterações na geometria do Universo. Pelo menos não ao longo de toda sua história. Entretanto, sabemos que os fótons dominam o cenário cosmológico em alguns momentos cruciais de sua história. Em particular, no cenário citado antes, os fótons estão associados ao *bouncing* pelo qual uma fase colapsante anterior passou à atual fase de expansão, sem que existisse uma singularidade inicial. Para entender a questão,

* A história está contada de modo técnico em M. Novello e S. Bergliaffa.

** No artigo citado na nota anterior são descritas várias propostas de Universo eterno. Como a quase totalidade dessas propostas, que possuem um *bouncing* ou “ricochete”, tem características geométricas bastante semelhantes, decidi apresentar aqui somente esse exemplo que, historicamente, apresenta a grande importância de ter sido a primeira solução analítica sem singularidade das equações da cosmologia.

é fundamental saber o modo pelo qual estes dois campos agem um sobre o outro.*

e) Universo cíclico

Os modelos cosmológicos podem possuir uma singularidade — como no big bang — ou ser eternos, como no caso de um Universo eterno dinâmico. Estes modelos de Universo eterno podem ser de dois tipos:

- Ter iniciado uma lenta expansão no infinito passado que continuaria até hoje.
- Ter tido uma fase anterior colapsante, à qual se seguiria — passado o momento no qual o volume total do espaço foi o menor possível — uma fase expansionista.

No caso de um modelo cíclico, haveria uma sequência de fases colapsantes e expansionistas que se sucederiam alternadamente. O começo deste Universo cíclico admite duas possibilidades: poderia ter surgido de uma singularidade inicial e, a partir dela, ocorreria uma sequência de fases expansionistas e colapsantes; ou poderia nunca ter tido um começo, e essas fases serem infinitamente enumeráveis para o passado.

O físico inglês R. Tolman, já em 1934, argumentava sobre a possibilidade de modelos cíclicos serem compatíveis com as leis que descrevem os processos gravitacionais no Universo e que são compatíveis com o cenário cosmológico proposto por Friedmann. O cosmólogo e cômico belga G. Lemaître foi outro

* A distinção é técnica demais para ser descrita aqui. O leitor interessado deve consultar as referências citadas.

grande defensor da existência de ciclos que caracterizariam um universo oscilante.

Considerando que, no modelo de Friedmann, a matéria é tratada como um fluido perfeito que conserva a entropia, isto é, como um sistema reversível, Tolman argumentou que seria possível inverter a expansão em um colapso sem violar nenhuma lei da física. Para transformar tal possibilidade em um modelo realista, faltou a Tolman gerar um cenário no qual a singularidade do universo de Friedmann pudesse efetivamente ser evitada. Caso contrário, uma fase colapsante terminaria inevitavelmente em uma singularidade onde “tudo que existe” seria aniquilado naquele ponto singular em que o volume total do espaço é zero.

Por outro lado, uma fase em expansão não deveria exibir uma singularidade inicial capaz de impedir a conexão com uma fase anterior colapsante. Ou até mais de uma fase. Nos cenários de Universo eterno, essa dificuldade é ultrapassada.

Modelos de Universo cíclico foram deixados de lado pelas mesmas razões que descrevemos antes, e que estabeleceram o domínio do cenário big bang, nas últimas décadas do século XX, sobre os outros modelos. Com o fim da hegemonia do modelo big bang, entende-se a razão pela qual a ideia de ciclos no Universo atraiu novamente o interesse dos cientistas.

Embora não haja evidência observacional de que nosso Universo tenha passado por ciclos diferentes, alternando períodos de expansão e de colapso, ao longo da primeira década do século XXI, vários projetos científicos se dedicam a examinar a possibilidade formal desses ciclos e sua compatibilidade com as leis da física. Se apresento aqui este breve comentário sobre o tema, isso se deve à atitude de alguns cientistas que consideram o Universo cíclico como uma possível resposta a várias questões abertas na cosmologia de hoje.

Devemos dizer, contudo, que esse modelo traz novas questões associadas a suas propriedades e compatibilização com as leis da

física em nossa vizinhança. Mas aceitar que essas leis permaneçam inalteradas nos diversos ciclos talvez seja uma simplificação ousada, que não temos o direito de fazer.

No estágio atual do conhecimento científico, a elaboração de cenários cosmológicos cíclicos com leis físicas distintas não é tarefa do cientista, a não ser como um procedimento exploratório, de caráter especulativo.

Conclusão

Quando, nas últimas décadas do século passado, o modelo big bang identificou, no cenário-padrão da cosmologia, a singularidade da geometria de Friedmann ao “começo de tudo que existe”, ele produziu uma descrição simples da história do Universo de grande apelo popular.* Essa visão, que pareceu a muitos a versão moderna de antigos mitos de criação, foi identificada com a descrição científica do começo de tudo que existe: uma grande explosão inicial cuja origem seria inacessível ao modo científico de analisar os processos físicos. Abdicar de examinar o momento de condensação máxima pela qual o Universo passou não deveria sequer ser considerada uma atitude científica, como mostrei neste texto. A extrema simplificação dessa descrição criou uma dificuldade que, cedo ou tarde, deveria aparecer como o fracasso do projeto científico de produzir uma explicação racional para a totalidade dos fenômenos físicos.**

O século XXI começou com uma modificação dessa atitude, e por várias razões. A mais abrangente delas tem origem colateral e está ligada à possibilidade da existência de uma aceleração

* Ver na página 24 comentário sobre a posição da Igreja Católica a esse respeito.

** Não deixa de ser curioso perceber que vários cientistas deixaram-se levar pela descrição desse mito de criação contido no big bang. Poderíamos aventar várias razões para isso, mas este não é o lugar para procurar as motivações dominantes na produção de um paradigma não científico por parte de cientistas.

da expansão do Universo. Vimos como isso pôs por terra alguns preconceitos sobre as propriedades que a matéria — representada pelo fluido cósmico que preenche todo o espaço — possui. Dentre elas, a ideia de que não podem existir fluidos com pressão muito negativa. Independentemente de observações futuras que poderão vir a apoiar ou não a interpretação sobre a aceleração do Universo, o que importa aqui é explicitar a mudança de atitude dos cientistas face às propriedades que pode ter a matéria/energia em escala cósmica.

Por conseguinte, empreendeu-se a investigação sistemática das causas daquele momento extremamente condensado que desemboca na atual fase de expansão pela qual passa o Universo. Cenários de Universo eterno começaram a ser considerados realistas pelos cosmólogos. Por conseguinte, puseram-se em andamento programas de análise de observações cósmicas capazes de evidenciar alguma propriedade anterior ao momento de condensação máxima, no estudo das propriedades em grande escala do Universo.

Estes programas estão procurando identificar características que distingam observacionalmente os diversos cenários de Universo propostos. Em particular, tem-se enfatizado o mecanismo pelo qual foram criadas as grandes distribuições de matéria observadas, como galáxias e aglomerados de galáxias.

Assim, a partir do que vimos aqui sobre a situação atual da descrição do Universo, podemos sintetizar nosso conhecimento cosmológico no que diz respeito à questão da singularidade inicial da seguinte forma:

1. O modelo big bang, ao identificar o começo do Universo a uma singularidade, criou uma questão de princípio, inibindo a possibilidade de uma descrição completa e racional da totalidade. Aceitando a existência de um momento de criação em um tempo finito, ele impede o conhecimento racional do Universo. Consequentemente, esse modelo não pode ser

entendido como uma descrição científica da totalidade do que existe.

2. A possibilidade de que a expansão do Universo esteja acelerada, acoplada à ideia de que a gravitação é descrita pela teoria da relatividade geral, criou dificuldades formais de compatibilidade com a física que conduziram à hipótese de que deveria haver um tipo especial de energia — denominada *energia escura* —, a principal responsável pela evolução do Universo.
3. Essa energia escura viola as condições de aplicabilidade dos “teoremas de singularidade”. Isso significa que esse tipo de matéria/energia permite configurações não singulares, isto é, impede que o Universo tenha tido um começo singular em um tempo finito.
4. Dentre esses cenários, o que possui maior consistência e embasamento teórico consiste no chamado Universo eterno dinâmico, no qual teria ocorrido uma fase de colapso gravitacional anterior à atual expansão.*

Epílogo

A cosmologia reconstruiu um modo antigo de pensar a natureza, colocando ênfase na noção de totalidade. A física newtoniana havia produzido a ilusão — tornada paradigma — de que seria possível entender o mundo como a soma cada vez mais abrangente e complexa de suas partes. No século XX, Friedmann, Dirac e Gödel transformaram radical e completamente essa visão:** o

* A análise da evolução de estruturas materiais em grande escala — como, por exemplo, as galáxias — permite distinguir propriedades do Universo associadas a uma fase colapsante anterior à atual fase de expansão.

** Detalhes técnicos destas análises podem ser encontrados em M. Novello e S. Bergliaffa.

primeiro, introduzindo dinâmica no próprio Universo; Dirac, sugerindo a influência das propriedades globais na formação das leis físicas; e Gödel, o mais radical, mostrando por que se deveria eliminar — e para toda cosmologia futura — a noção de tempo único global.*

No entanto, não devemos perder de vista que a ciência produz verdades provisórias. Em alguns momentos de sua história, uma dada explicação se mostra tão eficiente que os cientistas caem na tentação de considerá-la a verdadeira descrição da realidade, quando se trata somente de uma representação. Com a cosmologia não é diferente. Como se ocupa da totalidade maior, e que a ela é atribuída a função de construir o pano de fundo, o espaço-tempo, ao qual todo o resto da física deve se adaptar, a cosmologia adquire uma especificidade que a singulariza, tornando-a fundamento de toda descrição do real.

Podemos afirmar assim que o modelo explosivo foi transcendido. O cenário de um Universo eterno dinâmico veio tomar o lugar que o big bang havia inadvertidamente ocupado durante os últimos 30 anos. A ciência foi além daquele momento de condensação máxima. De imediato, ela se viu às voltas com outras questões. Por exemplo: se houve uma fase colapsante anterior, o que teria colapsado e por quê? E qual a razão para, depois de atingir um estágio de altíssima condensação, transformar a fase colapsante na fase de expansão atual em que vivemos?

A cosmologia tem produzido respostas para essas questões que estão ainda no terreno teórico, formal. Para decidir entre elas, devemos esperar que novas observações cósmicas confirmem as previsões. O desenvolvimento recente, associado às propostas de novos instrumentos de observação dos céus, permite pensar que,

* É importante notar, entretanto, que ela constitui ainda hoje uma das bases do cenário-padrão.

na próxima década, possivelmente saberemos algumas dessas respostas.

O big bang, esse estágio de condensação máxima pelo qual o Universo passou, deixou de ser identificado com seu “momento de criação” para se transformar — agora, de modo racional — em nada mais que um momento de passagem na história da evolução do Universo. Hoje, ao examinar as propriedades do programa do Universo eterno dinâmico e entendermos o processo físico que permitiu interromper o colapso gravitacional e penetrar na fase atual de expansão, percorrendo os caminhos que antecederam ao big bang, estamos realizando a função de retirar desse momento o início da história do Universo, projetando-a para um passado bem mais longínquo. Isso requer uma mudança nos hábitos de pensar a totalidade maior.

As propriedades não convencionais da matéria e do espaço-tempo descobertas no cosmo estão produzindo uma revolução fantástica na ciência, que lembra aquela que ocorreu lá atrás, no começo da ciência moderna, há mais de 300 anos, quando cientistas como Tycho Brahe, Kepler, Galileu, Newton e seus companheiros nos proporcionaram uma leitura fascinante do mundo supralunar. Nos dias atuais a cosmologia está produzindo um momento maravilhoso de encantamento e de novidades no comportamento da matéria que está muito além do que eles realizaram. Na verdade, para além da questão da origem do Universo, a cosmologia, ao promover a refundação da física* e a destruição do que pareciam ser sólidos paradigmas da ciência, produz mudanças radicais na descrição do real que inevitavelmente se difunde por todo o pensamento moderno. Este seria então o momento de perguntar: como esse modo de pensar o Universo afeta o discurso contemporâneo para além da ciência?

* M. Novello, *O que é cosmologia?*.

Deixarei o leitor aqui, interrompendo nosso diálogo sobre a cosmologia moderna. Não porque, com esse cenário de Universo eterno dinâmico, a história tenha chegado ao fim. Mas para que — livres do peso formal que a ideia ingênua da origem de tudo que existe como uma explosão inacessível, o big bang, impôs arrogantemente nestes últimos 30 anos — possamos refletir sobre essa eternidade que nos é estranha, para incorporá-la a nossos hábitos mentais. E, se possível for, resistir à tentação de considerar esse novo modelo a verdadeira história da criação do Universo.

Apêndice I

Diálogos sobre o começo do mundo*

Em 24 de agosto de 2002, durante um workshop no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), alguns cosmólogos reuniram-se para discutir uma das questões mais atraentes da cosmologia: a origem do Universo. O que segue são as anotações de uma conversa informal ocorrida naquela noite, entre três dos participantes, os professores Evgeni, Maurizio e Vitaly.

EVGUENI: Estou convencido de que, desde a belíssima conferência de Roger Penrose, podemos dizer que a questão da singularidade inicial do Universo está completamente resolvida. Não me parece haver a menor dúvida de que os teoremas demonstraram que houve um momento especial, único, em que tudo que existe esteve concentrado em uma região mínima, extremal. Poderíamos, de modo simplificado, associar esse momento a um verdadeiro ponto geométrico, ou pelo menos à ideia de que os primeiros matemáticos possuíam de tal ponto.

MAURIZIO: Bem, eu prefiro considerar a questão ainda aberta e passível de ser examinada sob perspectiva diferente. Não me considero tão satisfeito quanto você por esta demonstração. E posso explicar por que, apoiando-me tanto em considerações de caráter técnico quanto de caráter histórico. Se vocês me permitirem falar um pouco da história das ideias cosmológicas examinadas ao longo de todas as civilizações, acho que poderia mostrar

* Este artigo foi originalmente publicado em inglês por ocasião da homenagem aos 80 anos do professor Roberto A. Salmeron, com o título de “Roberto Salmeron Fetschrift (a master and a friend)”. Agradeço a Alberto Santoro a liberação para a publicação desta versão em português. Os nomes aqui citados são fictícios, não correspondendo aos personagens verdadeiros.

que essa aceitação por parte de E é um pouco precipitada. Eu a respeito como uma opinião — bastante majoritária em nosso meio científico —, mas não a consideraria mais que isso: uma opinião.

E: Isso é um absurdo! Você também estava lá e viu como ele foi aclamado por todos os presentes. A conferência foi considerada brilhante. Se o próprio Einstein estivesse presente, talvez o tivesse aplaudido de pé!

M: Não duvido. Eu mesmo o aplaudi, e muito. Mas vamos separar as coisas. Nós reconhecemos naquela conferência a habilidade matemática de Penrose para demonstrar um teorema. Não há dúvida de que, das premissas que ele partiu, usando para sua demonstração as equações da relatividade geral, segue-se esse resultado a que você se refere como “a inevitabilidade de uma singularidade no Universo”. Não estou pondo isso em discussão. Mas você deve concordar comigo que são dois momentos bem diferentes: a demonstração de um teorema e sua aplicação ao mundo real.

E: Sim, claro. Mas as condições de aplicação desses teoremas de singularidade são tão simples! Claro que elas são preenchidas no Universo. Isso é tão óbvio!

M: Para você, mas não para todos.

E: Ora, vamos lá. Até um crítico tão do contra como você há de convir que essas condições que constituem as premissas dos teoremas de Roger são aceitáveis! O que você acha, Vitaly? Você está tão calado o tempo todo... Não acha que eu estou coberto de razão?

VITALY: Bem, meus amigos, acho que há uma boa dose de verdade no que ambos dizem. Mas quanto a dar razão a E ou a M, esta é uma decisão que gostaria de tomarmos juntos, de chegarmos a um consenso. Afinal, não é bom que se espalhe a notícia de que, sobre assunto de tamanha importância e tão relevante para a ciência — e mesmo para além dela —, os cientistas não se ponham de acordo. Vamos usar o mesmo método que temos utilizado desde sempre para tentarmos chegar a uma posição comum.

E: Bem, eu não tenho nada contra.

M: Nem a favor. Mas estou disposto a discutir abertamente a questão e examinar o que dela sairá.

V: Então, vejamos. Começemos por recordar com muito cuidado e passo a passo o que foi realmente demonstrado por Roger Penrose. Na verdade, creio que deveríamos até lembrar como chegamos à situação que deu origem à possibilidade de esses teoremas serem pensados como tais. Serei obrigado a falar de coisas bem simples e mesmo triviais, que todos conhecemos de longa data. Mas assim fazendo creio que nos colocaremos na verdadeira perspectiva que deu lugar ao surgimento dos teoremas.

Em 1964, todos nos convencemos de que a famosa radiação térmica de $2,7^\circ$ Kelvin — que preenche todo o Universo — era a demonstração inequívoca de que o Universo passara por uma fase extremamente quente e condensada, isto é, ele experimentara um processo de expansão. Todos nós concordamos que a geometria do mundo, governada pelas equações da relatividade geral, deveria ser aquela descoberta por Friedmann em 1919. A medida feita por Hubble da velocidade de recesso com que as galáxias estão se afastando umas das outras tem a dimensão de uma quantidade que pode ser associada a um tempo; na verdade, a um inverso de um tempo. Esse número que está sendo assim medido tem o valor de uns poucos bilhões de anos. A questão é: o que teria acontecido ali? Por que este número aparece como uma característica especial desse Universo? Esta é a situação prática. Aquilo que nos é dito pelos astrônomos. Agora, vamos aos teóricos.

M: E isso não é uma teoria? As observações não nos mostram exatamente isso que você falou. Elas nos dizem algo somente a respeito de uma pequena mancha desviada em um aparelho que mede o espectro da luz que nos chega de galáxias distantes.

V: Sim, você tem razão. Mas devemos partir de algum embasamento teórico, não? Então aceitemos que estamos verdadeiramente observando a expansão do Universo quando enxergamos nessa decomposição espectral a que você se refere os desvios do espectro “normal”.

E: Você vê? Assim é o tempo todo. Parece que ele não aceita nenhuma verdade bem-estabelecida.

V: Mas eu não estou contra essa atitude! Acho mesmo que ele tem razão até de duvidar da estrutura em expansão. Outros cientistas fizeram o

mesmo, e ainda fazem. Lembram-se do professor Fred Hoyle? E quando seu colaborador indiano, Jayant Narlikar, aqui esteve, na Sexta Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação, comentou muito sobre isso. Mas aqui e agora, nossa questão é outra. É por isso que eu não gostaria de me desviar de meu caminho. Pelo menos não agora. Caso contrário, nossa discussão não terá fim, e, como vocês sabem, amanhã de manhã bem cedo é minha hora de falar. Não posso me estender noite adentro nessa conversa.

M: Está bem. Vamos nos limitar à afirmação de E sobre o começo do mundo.

E: Alto lá! Eu não estava falando de começo do mundo! Tudo que eu falei foi sobre a demonstração de Roger Penrose de que existe uma singularidade inicial. São vocês que estão identificando a singularidade ao início de tudo.

M: Mas você então pode falar do que teria ocorrido ali? Do que teria dado origem à singularidade?

V: Espere um pouco. Vamos tentar ordenar nossa discussão. Deixem que eu termine minha revisão preliminar do que está em jogo para depois começarmos a análise de cada um dos dois pontos de vista, está bem? *(Com o silêncio que se seguiu, ficou claro que V poderia continuar.)* Como eu estava dizendo, vamos aos teóricos. *(V fez um leve movimento de olhar para M, como se lhe pedisse autorização. Este compreendeu a brincadeira e deu um leve sorriso.)*

Lá atrás, nos primórdios da cosmologia moderna, a descoberta de que o modelo cosmológico de Friedmann possuía uma singularidade foi vivenciada como algo muito desagradável. Parecia que a atitude de não aceitar como propriedade da natureza a existência de uma singularidade real havia se cristalizado entre os físicos. A origem disso, naqueles tempos, parecia estar associada a uma questão semelhante à que acontecera na física das partículas elementares, estáveis. Ali também os cientistas se viram às voltas com uma singularidade ao longo da trajetória do elétron, ao longo daquilo que chamamos de sua linha de universo. Mas vamos deixar essa questão para outra hora, caso contrário iremos nos desviar de nossa análise.

De qualquer maneira, independentemente do humor dos físicos a esse respeito, todos concordavam que a singularidade da geometria do modelo de Friedmann era real. Isto é, não se tratava — como no caso do horizonte dos buracos negros — de uma singularidade fictícia. Assim, surgiu a questão: a existência dessa singularidade seria tão somente uma propriedade particular da geometria de Friedmann? Será que o ponto singular — esse lugar onde as quantidades físicas relevantes (a densidade de energia média e a temperatura) assumem valor infinito — seria uma propriedade matemática? Seria consequência das hipóteses simplificadoras de alta homogeneidade espacial e isotropia, necessária para a solução das complicadas equações de Einstein? Será que outras soluções, outras geometrias menos simétricas, contendo um grau de simplificação menor, exibiriam a mesma característica?

Durante algum tempo, fomos obrigados a viver na dúvida, sem saber sequer como responder a questão, a não ser pelo método ineficiente e trabalhoso de tentativas e erros. Até que Roger teve a feliz ideia de procurar respondê-la por métodos menos arcaicos, mais funcionais, mais ágeis, usando uma matemática mais sofisticada do que aquela que costumava ser empregada pelos relativistas, de origem menos formal, menos matemática. Foi então que apareceram os famosos teoremas de singularidade de que tratamos agora. Até aqui, estamos de acordo?

E: Sim.

M: Não é exatamente como você falou, mas podemos seguir em frente.

V: Pois bem, aceitemos isso. Agora vamos nos ater aos teoremas. Como eles são muito semelhantes, para o que nos interessa aqui, vamos nos concentrar em um deles. Por exemplo, o primeiro que Roger Penrose nos deu. Simplificadamente, o teorema afirma que pelo menos uma das quatro sentenças referentes a uma geometria arbitrária do espaço-tempo quadridimensional é falsa:

- (a) Os observadores fundamentais medem uma variação positiva do volume tridimensional.
- (b) A energia do mundo é positiva. Quando existe pressão negativa entre diferentes partes do fluido cósmico que gera a geometria do

mundo, ela não pode exceder o valor de menos três vezes a densidade de energia.

(c) As curvas do tipo-tempo podem ser estendidas para o futuro e para o passado indefinidamente.

(d) Existe uma separação do Universo em espaço e tempo.

Sei que estou apresentando uma formulação bastante simplificada do teorema, mas, para nossa discussão, isso me parece largamente suficiente. Muito bem, vamos examinar cada uma das sentenças e ver se alguma delas pode ser deixada de lado *a priori*. Se conseguirmos fazer isso, então nada poderá ser dito sobre a singularidade. Caso contrário, devemos repensar a situação.

Creio que a sentença (a) pode ser aceita como representativa de nosso Universo. A maravilhosa observação de Hubble garante que vivemos em um Universo dinâmico e que o volume espacial varia com o tempo.

A sentença (b) é mais fácil de ser entendida, embora talvez tenhamos alguma dificuldade em aceitá-la, pois conhecemos vários modelos de teorias de altas energias elaboradas pelos físicos em que essa propriedade não é verdadeira. Embora devamos reconhecer que, na maior parte dos casos — em condições “normais”, que podemos observar no Universo e que os astrônomos relatam —, essa propriedade é verdadeira. Deixemos em suspenso qualquer decisão definitiva quanto a ela, por enquanto.

A condição (c) é precisamente a que queremos identificar como a caracterização simplista de existência de singularidade. Esta seria caracterizada precisamente pelo aparecimento de um lugar no espaço-tempo para além do qual não poderíamos penetrar: a trajetória de todo observador deveria ser ali inexoravelmente interrompida. A condição (d) me parece a mais simples, e possivelmente todos concordaríamos em aceitá-la, não?

E: Sim, certamente eu consideraria que, na sequência das sentenças mais simples de serem aceitas, entre as quatro que você citou, esta é a que viria em primeiro lugar e positivamente a que menos problemas nos causará.

M: Pois eu digo que se trata precisamente do contrário!

E: Mas como?

M: Muito simples. Nossa descrição geométrica do mundo, a possibilidade de Einstein reduzir todo processo gravitacional, toda força gravitacional, a uma simples questão geométrica, a uma mudança particular da geometria do mundo, se deve aos esforços de dois grandes matemáticos alemães: Carl Friedrich Gauss e Bernhard Riemann. Eles mostraram como se deve proceder para estabelecer qualquer tipo de geometria que não seja euclidiana, isto é, que permita a existência de comprimentos nulos entre dois pontos separados no espaço-tempo, sem que para isso os dois pontos devam coincidir, devam ser o mesmo.

Pois bem, ao estabelecer as bases que sustentam toda geometria, Gauss mostrou também que a separação do mundo em três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo é somente uma particular e conveniente possibilidade de representação do mundo, daquilo que chamamos de um acontecimento ou evento, um sistema de coordenadas capaz de caracterizar todo e qualquer “ponto” quadridimensional. Ele mostrou que é sempre possível usarmos tal representação. Pelo menos localmente isso nada mais é que uma escolha, sem qualquer consequência sobre nossas observações do mundo, mas somente sobre sua descrição. Estamos assim no território da representação, e, como tal, ela pode ser arbitrariamente escolhida.

A separação em três dimensões de espaço e uma de tempo é somente uma entre um grande número de representações. Pois bem, Gauss foi um passo além e mostrou que a extensão dessa representação para além de uma região pequena, local (e, claro, o que estamos chamando “pequena” pode variar de uma dada situação física para outra) não depende mais apenas de uma escolha nossa, mas das propriedades físicas globais do espaço-tempo, isto é, da topologia do Universo.

E: Sim, claro. Nós todos sabemos isso. Mas seria totalmente absurdo imaginar que a estrutura global do mundo pudesse ser diferente, pudesse admitir a existência de curvas fechadas no espaço-tempo. Pois é isso que você está implicitamente aceitando ao negar aquela condição! Você está querendo atribuir à curiosa hipótese de Gödel sobre a estrutura do tempo uma realização, uma realidade que certamente ela não possui!

M: E como podemos saber isso? Como você pode provar a um cético como eu que existe em nosso mundo um tempo global? Com que instrumentos de observação — direta ou indiretamente — se pode fazer isso?

V: Bom, eu sou obrigado a aceitar que M formulou uma questão de difícil solução. Mas isso não invalida a argumentação. Só diminui seu poder de previsão.

M: E o uso dos teoremas menos arrogante...

E: Alto lá! O fato desta condição (d) ser menos evidente não a torna falsa. Eu, por exemplo, vejo nela a própria condição de existência da racionalidade do mundo. Um Universo que possuísse caminhos que levam ao passado seria a negação da minha visão de coerência causal do mundo.

M: Estranha essa sua ideia de racionalidade! Você considera “natural” que tudo que existe tenha tido uma origem singular, proveniente de uma região a que nunca teremos acesso, da qual nunca se poderá extrair qualquer informação. Como você poderia construir um mundo racional, causal (como parece empenhado em fazer), se o Universo tivesse tido origem naquela singularidade?

V: Bom, creio que vocês abandonaram minha proposta de examinar aos poucos essas questões. Por que não voltamos e tentamos encontrar um consenso? Está certo, creio que E se deixou levar pela beleza dos teoremas que Roger e outros nos deram. Mas penso que houve um avanço notável nessa análise teórica.

M.: Bem, certamente deixamos de lado aquela extravagante e até certo ponto ridícula sugestão de Lemaître, de associar a singularidade da solução de Friedmann à explosão de um átomo primordial. Qualquer ginasião sabe que átomos podem se desintegrar, e isso depende de processos físicos controláveis ou pelo menos compreensíveis. Daí a imaginar que nosso Universo seria semelhante a um átomo que se desintegra...

V: Não, eu não estava me referindo a esses primeiros trabalhos de cosmologia. Eu estava pensando, por exemplo, nos anos recentes, que

antecederam os teoremas. Por exemplo, vocês devem se lembrar da análise que Evgeni Lifshitz e seus colaboradores fizeram no começo dos anos 1960. Eles procuraram encontrar aquilo que seria a solução mais geral das equações da gravitação de Einstein. Durante algum tempo argumentaram que a haviam encontrado, e uma propriedade dela seria precisamente esta: não conter singularidade. Isso parecia confirmar a sugestão de que a presença da singularidade do modelo de Friedmann estaria associada à alta dose de simetria dessa geometria.

Em verdade, mais tarde se confirmou que Lifshitz não estava resolvendo a questão da singularidade, sua existência ou não. Ele estava verdadeiramente descobrindo como o Universo se comporta na vizinhança da singularidade do modelo de Friedmann.

E: E o resultado que eles encontraram foi maravilhoso: na vizinhança da singularidade, o Universo é dominado pelo vazio! A matéria não tem importância alguma na evolução do Universo, naqueles primórdios!

V: Isto é, mesmo cientistas de tão grande importância quanto Lifshitz ainda procuravam, nos anos 1960, associar o problema da singularidade à questão das simetrias do Universo. Como vemos, pelo menos quanto a essa direção, os teoremas foram um progresso.

M: Eu insisto em dizer que em momento algum pretendo retirar a relevância de Roger ou qualquer um daqueles matemáticos e físicos que se envolveram com esses teoremas. Quero deixar bem claro que estou me referindo à reação aos teoremas e ao modismo que se desenvolveu a partir deles. Como nosso colega E, muitas pessoas viram neles a demonstração da inevitabilidade de uma singularidade inicial, de um começo do mundo para *este* nosso Universo — com todas as consequências que daí decorrem. Ainda hoje não são poucas as pessoas que concordam com isso. O que eu insisto em afirmar é que eles causaram tanto bem quanto mal ao progresso da cosmologia. E isso, claro, quase independentemente de Roger Penrose e de outros.

V: Creio que podemos aceitar seu ponto de vista, atribuir limitadamente a responsabilidade a Roger e seus colegas para que possamos seguir em frente.

E: Está bem. Digamos que eles podem ser responsabilizados por deixarem essa opinião transbordar de sua demonstração. Mas teriam eles este poder que M quer lhes atribuir?

M: Não creio que devemos continuar nessa linha de argumentação. Eu preferiria deixar a responsabilidade diluída pela comunidade científica, e não a atribuir a alguns poucos agentes. Todos nós tivemos nossa parcela de responsabilidade. Voltando ao nosso tema central, há duas questões que poderíamos tentar examinar. Uma delas diz respeito à definição de singularidade utilizada implicitamente na formulação do teorema S. Vamos passar a chamá-lo assim? Isso simplifica nossa conversa e a deixa transparente para quem ouvir. A outra se refere aos diferentes esquemas criados e que exibem modelos de Universo sem começo nem fim, de Universo eterno, como tenho chamado.

V: Você não foi o primeiro a chamá-lo assim. Mas reconheço que, de todos nós, você é o que mais tem lutado por tornar este “Universo eterno” um tema de trabalho comum em cosmologia. Eu me lembro mesmo de uma vez, em Caxambu, quando você, ao dar uma palestra plenária sobre o tema, apresentou um modelo de Universo eterno. Para distingui-lo do modelo sem singularidade, conhecido entre os não especialistas — a geometria de De Sitter, estacionária, que não evolui com o tempo, ou melhor, que tem a mesma aparência em qualquer tempo, representando um Universo estático —, chamou-o de “cenário de Universo eterno dinâmico”.

Até aí tudo bem. A situação curiosa foi que, como todos faziam à época, por causa dos estrangeiros presentes na audiência, a transparência que você apresentou estava escrita em inglês. Nesse idioma, ao escrever o título de sua conferência, você sublinhou com uma caneta vermelha as iniciais. Ficou alguma coisa assim: *dynamical eternal universe scenario*. Claro que se tratava de uma inocente brincadeira, mas foi considerada ofensiva por alguns. E, mais grave ainda, eles acharam que se tratava de uma arrogância. Como se quisessem comparar os cosmólogos a Deus! Vejam só!

E: Voltando à nossa discussão, acho que posso responder a primeira questão de modo bastante simples. Basta examinar atentamente a sentença

(c) do teorema S. Ora, um observador real caminha sobre trajetórias que estão situadas no interior do cone de luz local. Isso nada mais é do que a afirmação de que todos os observadores reais devem viajar com velocidade menor que a da luz. Por observador estamos entendendo, claro está, qualquer corpo ou objeto material. Uma máquina carregada de instrumentos, por exemplo.

Ora, a menos que alguma coisa dramática aconteça em um dado ponto, essa trajetória não deve ser interrompida. Lembremos que estamos considerando somente a força gravitacional em jogo. Assim, se, em algum ponto de sua trajetória, ela é interrompida, não podendo ser estendida para além dele, neste ponto alguma coisa catastrófica acontece com o corpo. Ele literalmente desaparece do espaço-tempo. Ora, esse lugar bem mereceria ser qualificado como singular: um ponto onde a noção de contínuo espaço-tempo deve dar lugar a alguma outra coisa. Ou seja, podemos dizer que aquele ponto é singular.

M: Mas você há de concordar que não é esta a maneira usual, tradicional, com que definimos uma região singular em todas as outras teorias de campo. Se você quiser comparar com a situação do elétron que citamos há pouco, a história é bem diferente. Ali, o campo eletromagnético do elétron possui uma verdadeira divergência, é verdadeiramente singular, isto é, assume valor infinito!

E: Sim, isso é verdade.

V: Vamos então aceitar que o teorema S fala de uma propriedade que não se identifica com uma divergência tradicional de um campo físico, mas alguma coisa estranha e impeditiva acontece em algum lugar. Estamos todos de acordo? Bem, se é assim, isso pode estar sinalizando duas coisas. Ou há uma verdadeira singularidade, no sentido tradicional — embora com uma aparência nova, geométrica —, ou deve-se empreender outra descrição do que ali está se passando, possivelmente com uma conotação de natureza quântica, de gravitação quântica, quero dizer.

M: Eu preferiria que deixássemos por um momento a questão quântica. Isso levaria a outra discussão que podemos ter mais tarde e que certamente nos afastaria de nossa conversa sobre o começo do mundo.

V: De acordo.

E: Nesse caso, o que se poderia colocar no lugar da singularidade? O que, por exemplo, nosso colega M prescreveria para que o Universo pudesse seguir adiante — ou, melhor, para trás — além desse ponto primordial?

M: Se vocês quiserem, posso dar uma ideia simplificada de meu seminário de amanhã, logo depois do de V, onde respondo essa questão.

E: Se podemos criticar à vontade, eu aceito.

M: E alguma vez você deixou de me criticar?

V: Bem, bem, deixemos essas discussões de lado e vamos ao que nos interessa. Vamos lá, M, faça uma *avant-première* de sua conferência.

M: Pois bem, vamos a ela. Vamos seguir a mesma sequência da transparência que preparei.

A primeira questão que aparece é como conciliar a história da cosmologia com a descrição atual. Isso significa, dentro do cenário-padrão, que devemos identificar a estrutura da geometria do mundo, após a fase extremamente condensada inicial — e qualquer que seja ela —, à geometria de Friedmann. Podemos fazer isso sem maiores dificuldades, como veremos, mas o principal obstáculo consiste em impedir que essa geometria desapareça em uma singularidade inicial.

Vamos representar a geometria de Friedmann, convencionalmente, por um gráfico de $R(t)$ contra t . Ela representa como o que chamamos simplificada de “raio do Universo” varia com o tempo.

E: Ora vejam! Você criticou há pouco a ideia de um tempo global, único, para todo o Universo, e no primeiro momento em que fala de seu modelo, o que acontece? Usa precisamente esse conceito. Você faz apelo a um tempo cósmico! Isso não lhe parece contraditório?

M: Não, e explico por quê. Com esse modelo, nada mais pretendo que mostrar como é possível criar um cenário coerente e adaptável à visão comum, padrão, da cosmologia de hoje. Eu não quero me afastar dos cânones neste momento, e a razão é simples. Se eu não seguir a maior

parte das regras convencionais com que os cosmólogos têm construído modelos de Universo, muito possivelmente estaríamos envolvidos em outra discussão, e eu sequer poderia demonstrar aquilo que estou pretendendo.

Lembro que nossa questão agora é mostrar — dentro de um esquema convencional da física — como é possível evitar a singularidade cósmica e, conseqüentemente, produzir um cenário coerente de um Universo eterno. Nessa proposta, embora haja uma profunda mudança na estrutura da geometria do espaço-tempo, podemos simplificar a exposição identificando a alteração com um campo escalar. Eu vou só comentar as propriedades gerais do modelo. Os detalhes técnicos vocês vão ver e criticar amanhã. Pois então comecemos a examinar o que eu chamaria de “criação espontânea do Universo”.

A questão que estamos examinando pode ser colocada do seguinte modo: será possível, classicamente — isto é, sem fazer apelo a processos quânticos —, conectar as fases colapsante e expansiva de um Universo friedmanniano? A resposta é sim, e vários modelos capazes de descrever tal configuração foram examinados nos últimos anos. Uma lista mais completa pode ser encontrada em minha palestra na reunião da Conferência Internacional Marcel Grossmann-9, em Roma. Aqui, vou me concentrar em examinar somente um desses modelos, recentemente elaborado, e que tem por base a modificação da estrutura geométrica do espaço-tempo.

Ao passar pela fase extremamente condensada, tendo atingido seu raio mínimo R_0 , o Universo sofreu violentas mudanças globais em seu comportamento. Dentre elas, nos interessa examinar a modificação estrutural de sua geometria. Para compreender como essa alteração é possível, pelo menos em princípio, devemos primeiro entender um problema delicado e responder a questão: se observações efetuadas em um dado momento e em uma determinada região do espaço indicam o tipo particular de estrutura geométrica do mundo, como podemos concluir que essa estrutura será mantida ao longo da história do Universo? Dito de modo mais técnico: se, em uma dada hipersuperfície tridimensional $\Sigma - 1$ (aquilo que costumamos chamar de espaço tridimensional), a estrutura geométrica é do tipo riemanniano, podemos afirmar que a estrutura desse espaço-tempo em uma outra hipersuperfície $\Sigma - 2$, no futuro de $\Sigma - 1$, será também riemanniana?

E: Certamente! Para demonstrar isso podemos usar a mesma argumentação que nosso colega Stephen Hawking empregou para demonstrar questão semelhante envolvendo a impossibilidade de criação de matéria *ex nihilo*. Se, em uma dada superfície $\Sigma-1$, a energia da matéria é nula, ela será nula em qualquer outra superfície $\Sigma-2$, no futuro de $\Sigma-1$. Para mostrar isso basta utilizar a lei de conservação de energia.

M: Pois, do mesmo modo que Hawking estava enganado nessa demonstração, você também está.

E: Como assim? Ele estava enganado?

M: Estava, e creio que V pode explicar isso melhor que eu, pois ele esteve envolvido nessa discussão, não é verdade V?

V: Bem, eu não estive diretamente envolvido, mas participei da discussão com meu colega Zeldovich. Posso resumir a questão de modo conciliador. O argumento de Hawking está correto se nos limitarmos ao mundo clássico. Mas, como é possível haver excitação quântica do vácuo, o campo gravitacional pode produzir partículas e alterar aquela configuração do vazio. Assim, o argumento de Hawking não é válido no mundo quântico. Ele reconheceu isso e ficou tão empolgado por esse argumento contrário que o integrou a seu pensamento, elaborando a partir dele a brilhante ideia de que um buraco negro deve irradiar energia!

M: Mas como nós não podemos dizer à natureza para ela só se comportar classicamente, então o argumento estava errado. Do mesmo modo, aqui. Para entendermos isso, devemos nos situar no interior de uma teoria física que seja capaz de descrever o comportamento do campo gravitacional ao longo de toda a história do Universo. Modificações estruturais na geometria podem ocorrer de modo semelhante ao que ocorre com a matéria ordinária, que pode exibir transições de fase (passagem de um estado líquido ao gasoso, por exemplo) controladas pela temperatura.

Quando o Universo se encontra extremamente condensado, nas vizinhanças de seu raio mínimo R_0 (o que, de acordo com a descrição friedmanniana típica, é sinônimo de temperatura muito elevada), pode ocorrer uma transição de fase geométrica. Quando essa transição é suave e as alterações contínuas, é possível estabelecer uma descrição analítica

do processo, associada a uma modificação efetiva da formulação da gravitação na relatividade geral. Pode-se descrever esse processo como a passagem de configuração de uma geometria riemanniana (quando o Universo é suficientemente grande, comparado a R_0) para uma estrutura descrita pela geometria de Weyl integrável, o chamado wist, das iniciais de Weyl Integrable Space-Time. Alarga-se assim o número de variáveis necessárias para descrever a gravitação.

Como devemos tratar do Universo espacialmente homogêneo, esse número se reduz a dois: além do raio $R(t)$, devemos conhecer também outra função $\omega(t)$ que controla o afastamento da estrutura riemanniana do espaço-tempo. Quando a função $\omega(t)$ é uma constante, a geometria é riemanniana; a estrutura wist só aparece naquelas regiões onde ω não é uma constante. Nesse caso, a questão a que nos referimos acima pode ser reinterpretada: se a função ω é praticamente constante hoje, como pode ela ter variado ao longo do tempo cósmico? A resposta é fácil de ser representada.

Por questões técnicas, estamos interessados particularmente na variação temporal da derivada de ω . A razão para isso é que o afastamento da geometria riemanniana é medido precisamente pela variação de ω . O raio do Universo, $R(t)$, admite, graças a essa dependência funcional da função $\omega(t)$, a configuração eterna (isto é, não singular).

É possível, pictoricamente, representar esse Universo associando-o a um gás contido em uma caixa que dispõe de um pistão capaz de fazer variar o seu volume, passando por várias fases:

Fase 1 ■ Graças à instabilidade do vazio, pequenas perturbações (representadas simbolicamente pelo pistão) crescem: um Universo vazio começa a colapsar, o seu volume V decresce lentamente.

Fase 2 ■ Quando o Universo atinge seu volume mínimo V_0 , a aceleração do pistão é máxima.

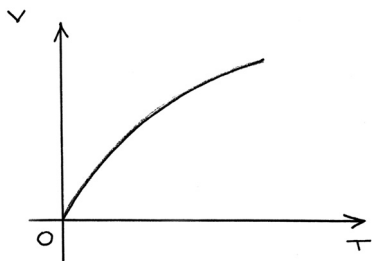
Fase 3 ■ Atingindo o volume mínimo V_0 , a força sobre o pistão inverte sua direção, o espaço-tempo começa a fase de expansão, a princípio muito rapidamente, diminuindo com o passar do tempo.

Fase 4 ■ O Universo continua sua lenta expansão.

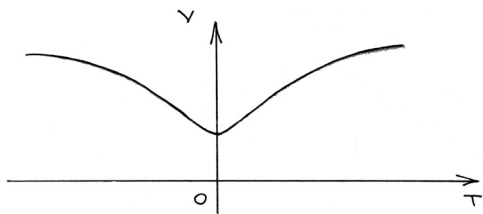
Enquanto as fases 1 e 4 têm duração muito grande, as fases 2 e 3 ocorrem rapidamente. É como se o Universo, ao se aproximar da vizi-

nhança do seu volume mínimo V_0 , sofresse um sobressalto de curtíssima duração.

Definimos assim, arbitrariamente, o ponto $t = 0$ como correspondente ao momento de máxima condensação ou raio mínimo. A função ω se torna uma constante longe de $t = 0$. Sua concentração em torno da origem $t = 0$ sustenta a afirmação de que a estrutura wist se encontra limitada, temporalmente, a uma pequena fase da história do Universo, em torno de seu ponto de máxima condensação. O campo ω passeia pelo Universo, controlando sua geometria, como um pulso variável no tempo e de amplitude máxima centrada em torno da origem $t = 0$, justamente no instante de transição da fase colapsante à fase expansiva.



Representação gráfica da variação do volume total do espaço tridimensional no modelo big bang. Note-se que, no tempo $t = 0$, o volume total se reduz a 0, e o espaço, a um ponto.



Representação gráfica da variação do volume total do espaço tridimensional no Universo eterno dinâmico. Note-se que, no tempo $t = 0$, o volume total passa pelo seu valor mínimo. Antes desse ponto, o Universo tem uma fase colapsante; depois, uma fase de expansão.

Tudo se passa como se uma onda espacialmente homogênea preenchesse todo o Universo, caminhando do infinito temporal passado (riemanniano) para o infinito temporal futuro (riemanniano), espalhando-se nessas regiões assintóticas, tendo concentrada sua energia (definida em termos da quantidade ômega em torno do ponto $t = 0$). Chamamos esse pulso temporal de wiston. Ele induz e controla a variação estrutural da geometria, permitindo a passagem de uma configuração riemanniana para outra, por meio de uma ponte geométrica da forma weyl integrável.

Curiosamente, além da solução wist descrita acima, é possível construir outra solução — que chamamos antiwiston — que representa uma configuração oposta.

Aqui aparece uma particularidade notável do modelo: como a energia dos wistons (respectivamente, antiwiston) não depende de ômega, mas de seu quadrado, concluímos que ambas as configurações (wiston e antiwiston) geram a mesma evolução temporal para o raio do Universo.

E: Você poderia explicar um pouco mais a origem dessa onda? Trata-se de um campo físico? Ela carrega energia?

M: Veja bem, trata-se do campo gravitacional. O campo gravitacional é um campo físico. Mas, na teoria da relatividade geral, não sabemos como definir uma densidade de energia para ele, não sabemos definir uma energia localizada do campo gravitacional. Pois o mesmo ocorre com o wist. Na verdade, estou adicionando uma função a mais na geometria. Vista desse modo, estou considerando que a gravitação requer uma descrição um pouco mais complexa da geometria, envolvendo também a possibilidade de sua flutuação entre uma geometria de Riemann e de Weyl.

E: Essa teoria parece muito próxima dos resultados recentes de *strings*. Você poderia me explicar se estou certo?

M: Em parte sim, é parecida. Mas essa longínqua semelhança eu deixo para contar amanhã, durante meu seminário, está bem? A invariância sob a transformação de inversão temporal a que me referi teria profundas repercussões filosóficas sobre a direção temporal na qual a evolução

ocorre, não fossem certas particularidades envolvendo o comportamento das flutuações dos vácuos dos diferentes campos físicos. Isso nos leva a entrar na questão da cosmogonia, a saber: qual a origem da matéria? Do mesmo modo, devemos procurar responder a pergunta: é um Universo eterno instável?

Antes de responder, é preciso esclarecer um pouco melhor qual o significado da questão. Um Universo tão simétrico quanto o de Friedmann pode ser considerado o ponto final de configurações anteriores, menos simétricas, que teriam dissipado suas irregularidades por algum processo físico. Ou então, o que é mais aceito, pode ter tido uma origem, num tempo finito ou infinito, sendo projetado diretamente nesse estado. Mesmo que não desejemos pôr o foco de nossa atenção na análise dessa questão, ela nos permite considerar o contexto em que devemos situar a pergunta.

Um Universo homogêneo e isotrópico pode sofrer perturbações, pequenas alterações em suas propriedades geométricas — possivelmente induzidas por flutuações materiais aleatórias, de diferentes características, não necessariamente preservando as mesmas simetrias que a geometria original. Isso significa que, sobre a estrutura friedmanniana considerada básica, pequenas perturbações podem ocorrer, induzindo desvios em suas propriedades — por exemplo, em sua condição de ser espacialmente homogênea — bem como em sua isotropia. Se esses desvios crescessem fora de controle, isto é, se pequenas flutuações da geometria crescessem, tornando-se macroscópicas, um Universo eterno certamente deixaria de ser homogêneo em algum momento ulterior. Do mesmo modo, deve-se considerar a questão das flutuações de entropia e de densidade da matéria aí presentes. Se elas pudessem crescer sem controle, um Universo eterno levaria ao paradoxo de conter uma quantidade infinita de matéria e de entropia — com as dificuldades óbvias de tratamento formal que daí decorrem.

Assim, simplificada e considerada, essa talvez seja a maior dificuldade que se apresenta a todos os modelos que propõem um Universo não singular, eterno: como controlar suas perturbações, como inibi-las, ou melhor, como estabilizá-las? O cenário wist consegue resolver a questão de modo particularmente simples e elegante, mas os detalhes eu deixarei para minha conferência.

E: Eu gostaria de voltar a examinar o modelo-padrão, pois não me parece que tenhamos verdadeiramente necessidade de abandoná-lo. E, se me

permitirem, eu gostaria de expor brevemente minhas razões, que se chocam com as que M apresentou.

V: Claro, isso será muito interessante, pois poderemos opor um cenário ao outro, logo em seguida.

M: Desde que vocês não utilizem o argumento de autoridade...

E: Como assim?

M: Veja, não creio que os argumentos que E irá apresentar — e eu os conheço muito bem — sejam mais rigorosos que os meus. Suas premissas, seu embasamento teórico, são de natureza semelhante, e os dois não podem ser questionados pela observação, pois suas principais afirmativas estão longe de nosso poder atual de observação. Assim, entre dois modelos igualmente teóricos, se não se pode decidir na observação, como faremos? Pela autoridade? Pela maioria, como numa votação?

V: Vamos deixar isso para mais adiante? Ouçamos o que E tem a dizer sobre a singularidade.

E: Eu começaria por modificar um pouco o tema de nossa questão e considerar um ou dois problemas colaterais que, penso eu, são mais tratáveis, pois estão relacionadas às observações. Por exemplo, a questão causal. Creio que estamos de acordo em que existe uma estrutura causal mesmo na presença de campos gravitacionais intensos, e que isso requer a existência de uma velocidade máxima de propagação para toda forma de informação.

Ora, se o Universo teve uma singularidade, isso quer dizer que nós não observamos todo o Universo, pois só é possível observar aquela parte limitada da qual pudemos ser informados desde o momento de condensação máxima. Para simplificar minha exposição, eu me limitarei a considerar que o triespço é infinito e euclidiano. Isto é, o triespço coincide com o que todos nós — relativistas ou newtonianos — chamamos simplesmente de espaço.

Isso significa que, logo imediatamente após o big bang singular, todo o espaço já estava constituído. De imediato impõe-se uma questão. Observações precisas garantem que o Universo observado é bastante

homogêneo e isotrópico. E, no entanto, diferentes partes desse Universo não teriam trocado informação no momento em que a homogeneidade estaria sendo organizada! Como teria sido possível a homogeneização sem violar a causalidade? Esta é certamente uma questão bastante séria e que exige uma resposta fechada, sob pena de inviabilizar o modelo de Friedmann.

Pois bem, o modelo inflacionário apresentou uma proposta simples e que possui consequências passíveis de observação — e, como tal, está dentro do esquema convencional da ciência. A ideia é tão simples que provavelmente mais de um cientista a imaginou. Contudo, a história da física, como qualquer tipo de história, é feita por aqueles que detêm o poder. Atribui-se a Alan Guth a ideia original, ou pelo menos ele é considerado seu autor por ter conseguido publicidade suficiente para tornar a proposta aceita pela comunidade dos cosmólogos. É bem verdade que hoje consideramos que vários outros cientistas apresentaram antes dele trabalhos semelhantes, como Alexey Starobinsky, Katsuito Sato e outros.

A base da ideia consiste na possível existência de um período na evolução do Universo no qual sua expansão teria sido muito mais rápida que a tradicional, gerada por um fluido perfeito convencional. Essa expansão acelerada teria tido origem em alguma forma de constante cosmológica ou fluido de pressão negativa que teria controlado a evolução da curvatura do espaço-tempo nos primórdios de nossa era expansionista. A sustentação dessa proposta veio principalmente da física das altas energias e seus campos esdrúxulos ainda não observáveis — tais como o campo escalar chamado de dilaton. Não quero criticar esse cenário, mas, ao contrário, mostrar que ele produz um modelo bastante razoável, compatível com as observações e sem dificuldades causais.

M: De certo modo, as dificuldades causais não foram resolvidas, mas — para usar um termo bem ao gosto dessa comunidade a que você se referiu — transcendidas. Como o Universo causalmente conectado àquela região primordial não se refere à totalidade, mas somente à parte que observamos, a causalidade está garantida. Mas você não acha que se esconde o problema? Ou você é adepto daqueles cientistas positivistas que consideram qualquer comentário para além de nosso horizonte observável simples matéria de ficção? Isto é, você está escondendo a questão da singularidade, e não a resolvendo.

E: Pois é isso mesmo. E estou convencido de que devemos adotar essa posição como a mais racional no estado atual de nosso conhecimento do Universo.

V: Bem, eu não gostaria de tomar partido nem de um lado nem do outro, mas devo confessar que seu argumento, E, de não apresentar uma descrição completa do Universo — nem que seja um simples modelo ingênuo —, não me satisfaz nem faz parte da tradição científica. Creio que devemos, a todo momento da evolução de nosso conhecimento racional do mundo, tentar encontrar um modo pelo qual possamos extrair um modelo global e completo do Universo. Mesmo sabendo que ele é provisório e possui pontos fracos que deverão ser substituídos à medida que avança nosso conhecimento.

E: Pois eu não acredito nisso. Creio que nossa atividade racional como cientistas deve apresentar uma descrição daquilo que pode ser contestado ou confirmado pela observação.

M: Você certamente não assimilou a leitura do famoso diálogo entre Bohr e Einstein a respeito da mecânica quântica. Caso contrário, você se lembraria de que o que está em jogo ali é precisamente a possibilidade de a ciência produzir uma descrição completa do mundo em todos os níveis da realidade, sem que em algum momento uma hipótese não comprovada se interponha entre o discurso e o conhecimento científicos.

V: O que M está querendo dizer — corrija-me se o entendi mal — é que todo discurso sobre a visão científica do mundo não pode abdicar de ser completo. Como consequência natural disso, ele deve conter alguma hipótese de princípio a que devemos recorrer para dar sentido ao nosso modelo.

E: Eu entendi muito bem o que ele disse. E, com certeza ainda maior, definitiva e positivamente não concordo!

V: Mas vamos deixar para continuar a discutir isso amanhã em nossa reunião, certo?

E: Está bem.

M: Concordamos finalmente em algum ponto!

Apêndice II

Cronologia comentada da cosmologia

Durante o ano de 2007, o Instituto de Cosmologia Relatividade e Astrofísica (Icra) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), solicitou a uma equipe de cientistas que produzisse um pequeno resumo dos principais momentos que marcaram a cosmologia moderna, desde o começo, em 1917, até o final do século XX.

Creio ser útil para o leitor ter essa cronologia a seu alcance, e por isso resolvi incluí-la como apêndice a este livro. Para permitir ao não especialista entender a relevância desses marcos históricos, acrescentei ao longo do texto pequenos comentários explicativos para aquelas datas que possuem conexão com o tema central deste livro. O leitor interessado em outros detalhes e/ou uma análise mais completa da cosmologia moderna pode consultar as obras mencionadas na bibliografia.

Associada a esta cronologia, o Icra criou um pôster. O leitor interessado pode solicitar um exemplar, no endereço do Icra/CBPF: rua Doutor Xavier Sigaud, 150, Urca, Rio de Janeiro, RJ, CEP 22290-180.

A década de 1910

1915

O físico alemão A. Einstein (1879-1955) cria uma nova teoria da gravitação, a relatividade geral (RG), identificando a força gravitacional com a estrutura geométrica do espaço-tempo.

1917

Einstein propõe o primeiro modelo cosmológico relativista e introduz uma nova constante universal representada pela letra grega Λ (lambda), chamada de constante cosmológica. Esse modelo representa um Uni-

verso finito e estático, isto é, sem expansão: o volume total do espaço tridimensional não varia com o tempo.

O astrônomo holandês W. de Sitter (1872-1934), usando as equações da relatividade geral de Einstein, estabelece o segundo modelo cosmológico e mostra que, contrariamente ao modelo de Einstein, aquele mesmo Λ pode produzir um Universo em expansão em regime estacionário, isto é, com velocidade de expansão constante. A existência de Λ é suficiente para produzir esse Universo, desprezando a ação da matéria e da energia. Assim, o modelo de De Sitter não tem matéria, é pura geometria.

A década de 1920

1922

O primeiro modelo cosmológico do físico russo A. Friedmann (1888-1925) representa um Universo espacialmente homogêneo (mesmas propriedades em qualquer lugar do espaço) e isotrópico (mesmas propriedades em qualquer direção do espaço) que se expande desde seu começo, quando o volume é 0, até um volume máximo, e depois se contrai atingindo novamente a singularidade (volume igual a 0). A fonte dessa geometria é um fluido perfeito, cuja energia se distribui de modo incoerente, sem interação entre suas partes (ou seja, sem pressão).

1924

Friedmann publica um segundo modelo cosmológico semelhante ao de 1922, com a importante diferença de que, na nova solução, a estrutura do espaço tridimensional permite que o volume total do Universo aumente indefinidamente.

1927

O padre belga G. Lemaître (1894-1966) constrói um modelo cosmológico que representa um Universo em expansão, contendo matéria, radiação e constante cosmológica Λ . Associa a singularidade inicial desse modelo à noção de “átomo primordial”, apresentando uma hipótese cosmogônica segundo a qual o Universo teria resultado da desintegração

radioativa de um átomo. Quase 30 anos depois, essa “explosão” reaparece no imaginário cosmológico representado pelo cenário big bang.

O matemático americano E. Kasner (1878-1955) constrói uma solução das equações de Einstein, sem matéria e sem constante cosmológica, que representa um Universo espacialmente homogêneo, mas anisotrópico, isto é, com propriedades distintas em diferentes direções.

1929

O astrônomo americano E.P. Hubble (1889-1953) deduz a relação empírica do afastamento das galáxias a partir de dados observacionais e introduz o conceito do Universo em expansão, talvez a maior descoberta já feita na cosmologia.

O matemático e físico americano H.P. Robertson (1903-61) estabelece uma forma matemática que representa universos espacialmente homogêneos e isotrópicos, do tipo de Friedmann. Esse modelo de Universo obedece ao “princípio cosmológico” segundo o qual todos os pontos espaciais têm as mesmas propriedades físicas e geométricas.

A década de 1930

1932

Einstein e De Sitter descobrem uma solução cosmológica de tipo semelhante à de Friedmann, tendo espaço homogêneo e isotrópico, caracterizado por uma geometria euclidiana. A fonte desse Universo é um fluido perfeito sem pressão.

1933

O astrônomo búlgaro F. Zwicky (1898-1974) propõe o conceito de matéria escura graças às observações das velocidades locais das galáxias em aglomerados. Zwicky e colaboradores inferem que há muito mais matéria no Universo do que aquela que emite luz visível (estrelas).

1937

Uma nova questão surge na cosmologia. Inverte-se o pensamento tradicional, de como a matéria influencia o comportamento global do Uni-

verso para como o Universo influencia as próprias leis da física. O físico britânico P. Dirac (1902-84) lança a hipótese de que algumas constantes fundamentais da física (a constante de Newton, por exemplo) poderiam depender do estado cosmológico em que o Universo se encontra (a interação gravitacional muda com a evolução cósmica).

Seguindo este modo de pensar, em 1967, o físico russo-americano G. Gamow (1904-60) sugere que a carga do elétron poderia variar com o tempo cósmico (a interação eletromagnética muda com a evolução cósmica). Em 1972, o físico brasileiro Mário Novello reorienta essa análise argumentando que não seriam as constantes fundamentais da física que poderiam depender do tempo cósmico, mas os próprios mecanismos de interação. Como exemplo dessa orientação, sugere que, nos processos de desintegração da matéria via interação fraca, a violação da paridade dependeria do estágio de evolução do Universo (a interação fraca muda com a evolução cósmica).

A década de 1940

1941

A. MacKellar observa os primeiros dados sobre a existência de um mar de fótons em equilíbrio termodinâmico como um espectro térmico (corpo negro) a $2,3^\circ$ Kelvin. Esses dados foram ignorados durante mais de 20 anos, em parte pela conjuntura da Segunda Guerra Mundial, sendo observados novamente nos anos 1960, por dois radioastrônomos americanos.

1948

Gamow desenvolve a ideia de um Universo em expansão, com uma fase primordial extremamente quente, permitindo a produção dos primeiros elementos químicos leves do Universo (hidrogênio e hélio). Faz uma estimativa da temperatura do Universo entre 1° e 5° Kelvin.

O matemático anglo-austriaco H. Bondi (1919-2005), o astrofísico austríaco T. Gold (1920-2004) e o astrônomo britânico F. Hoyle (1915-2001) exploram a ideia de um Universo em expansão a uma taxa constante, caracterizando uma geometria semelhante a de De Sitter

(Universo *steady state*). Generalizam o antigo “princípio cosmológico” para o que chamam de “princípio cosmológico perfeito”, que estende a homogeneidade do espaço para a do tempo; isto é, a configuração do Universo é sempre a mesma, representada por uma geometria não estática, mas estacionária. Desde essa época até a década de 1960 o modelo do estado estacionário constitui o maior adversário do modelo big bang.

1949

O matemático austríaco K. Gödel (1906-78) mostra que as equações da relatividade geral permitem gerar geometrias possuindo curvas do tipo-tempo fechadas, isto é, caminhos que conduzem ao passado. A partir daí, a estrutura da causalidade e a noção de tempo cósmico global recebem uma profunda crítica que não foi resolvida até hoje pela relatividade geral.

A década de 1950

Quando recebi o relatório da Comissão do Icara para elaborar o pôster de cosmologia, um fato chamou de imediato minha atenção: a década de 1950 não continha verbete. Isso significa que, no período correspondente a toda a década de 1950, não se encontrou qualquer notícia relevante envolvendo a questão cosmológica. Por que seria isso? O que teria acontecido coletivamente — nas diferentes agências e institutos de pesquisa espalhados pelo mundo — de tão determinante a ponto de impedir que alguma novidade sobre o Universo ganhasse uma dimensão mínima capaz de aparecer como um fato relevante em nossa compreensão da evolução e da estrutura do Universo?

A década de 1960

1963

Os radioastrônomos americanos A. Penzias e R. Wilson observam a existência de uma radiação cósmica de fundo, constituída por um mar

de fótons em equilíbrio termodinâmico como um espectro térmico (corpo negro) a 2,7° Kelvin, confirmando o fenômeno constatado por MacKeller em 1941. A radiação cósmica de fundo é associada a uma evidência do cenário big bang.

1967

O físico russo A. Sakharov (1921-89) propõe um modelo das partículas elementares capaz de explicar a assimetria matéria-antimatéria dos constituintes fundamentais da matéria bariônica (como o próton e o nêutron) existentes no Universo.

A década de 1970

1970

V.C. Rubin e W.K. Ford encontram evidências da matéria escura estudando a curva de rotação das estrelas em galáxias vizinhas à Via Láctea.

1972

Criação do Primeiro Grupo de Cosmologia e Gravitação do Brasil, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).*

1977

Para explicar a abundância de elementos químicos leves (hidrogênio, hélio etc.) e as diferentes escalas de estruturas do Universo, B.W. Lee e S. Weinberg, nos anos 1970 — em trabalho complementado por J.R. Bond, G. Efstathiou e J. Silk, nos anos 1980 — elaboram o conceito de matéria escura não bariônica (matéria escura não seria formada por prótons, nêutrons e elétrons como a matéria ordinária).

* Esta data aparece aqui porque representa um momento importante na ciência brasileira. Foi nesse ano que se estabeleceu o primeiro programa de cosmologia em nosso país, com a criação do grupo de Cosmologia e Gravitação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

1978

Realização da Primeira Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação, hoje chamada Brazilian School of Cosmology and Gravitation (BSCG), no CBPF. A partir daí, as escolas têm se realizado a cada dois anos. Nelas são apresentadas as pesquisas mais modernas em cosmologia, gravitação, astrofísica e áreas afins.

Penzias e Wilson ganham o Prêmio Nobel pela descoberta da radiação cósmica de fundo.

1979

Os físicos brasileiros M. Novello e J.M. Salim elaboram o primeiro modelo cosmológico com *bouncing*, tendo fótons não lineares como fontes. O Universo possuiria uma fase anterior de colapso em que o volume diminui com o tempo, atinge um valor mínimo e depois passa a se expandir.

Os físicos russos V. Melnikov e S.V. Orlov elaboram o primeiro modelo cosmológico com *bouncing*, tendo campos escalares quantizados (quebra espontânea de simetria) como fontes.

A década de 1980

1981

Modelo de Universo inflacionário. Alguns físicos elaboram a proposta do modelo inflacionário, reatualizando a importância da constante cosmológica num breve período da história da evolução do Universo. A inflação do Universo consiste na existência de um período de expansão geométrica extremamente acelerada, que teria ocorrido vizinho à singularidade do modelo de Friedmann.

1983

J. Huchra, M. Davis, D. Latham e J. Tonry realizam o primeiro mapeamento da distribuição de matéria ordinária em grandes escalas no Universo.

1982

O cosmólogo canadense J.E. Peebles relaciona a evolução de pequenas alterações na temperatura da radiação cósmica de fundo com a criação

de estruturas como galáxias e aglomerados de galáxias, levando em conta a matéria escura e as flutuações iniciais.

1987

Lentes gravitacionais. * Descoberta dos primeiros arcos gigantes formados pelo efeito de lente gravitacional. O estudo desse fenômeno, além de comprovar o desvio da luz pela gravidade, confirma a presença de matéria escura em aglomerados de galáxias.

1989

Lançamento do Cosmic Background Explorer (Cobe), satélite explorador do fundo cósmico. **

A década de 1990

1990

Lançamento do telescópio espacial Hubble. Missão espacial que tinha como um dos principais objetivos determinar a taxa de expansão atual do Universo, denominada parâmetro de Hubble. Hoje o satélite é utilizado para inúmeros estudos cosmológicos.

1998

Aceleração do Universo. Medidas da luminosidade e *redshift* de explosões de supernovas do tipo Ia sugerem fortes evidências de que o

* Denomina-se lente gravitacional qualquer corpo material capaz de produzir modificação na trajetória da luz que circun-navega próxima, graças à força gravitacional exercida por esse corpo.

** O detector Firas (da sigla em inglês para Espectrofotômetro Absoluto do Infravermelho Extremo) mostrou que a radiação cósmica de fundo segue um espectro térmico (corpo negro) com grande precisão. Já o detector DMR (da sigla em inglês para Radiômetro Diferencial de Micro-ondas) constatou a existência de pequenas diferenças de temperatura na radiação cósmica de fundo, que seriam as sementes das estruturas no Universo.

Universo teria sofrido uma transição de fase e que passa atualmente por uma fase de expansão acelerada.

Século XXI

A observação de que o Universo tem sua expansão acelerada criou um grave problema para a teoria da relatividade geral. Segundo essa teoria, a causa da aceleração estaria associada a uma substância com propriedades esdrúxulas que se convencionou chamar de “energia escura”. Esta parece ser a substância dominante no Universo, embora não se saiba precisamente “o que ela é” e “de que tipo de energia se trata”. A energia escura, assim como a matéria escura, constitui o fenômeno observado a demonstrar mais diretamente que as atuais teorias das partículas elementares e da gravitação estão incorretas ou incompletas. Observações cósmicas do século XXI mostram que cabe considerar seriamente a hipótese de que a teoria da gravitação de Einstein deve ser modificada. Por conseguinte, deveríamos esperar o surgimento de uma nova cosmologia.

Glossário

Aceleração do Universo e energia escura: O volume total do Universo $V(t)$ depende do tempo cósmico através de uma função $A(t)$ dita raio do Universo, ou, mais precisamente, fator de escala. A expansão do Universo é caracterizada pelo fato de que esse raio não é constante, mas varia como tempo representado pela letra t . A variação de $A(t)$ é descrita por outra função representada pela letra H .^{*} Quando a variação for constante, então H é constante — como no caso *steady state*; quando a própria variação for função do tempo, isto é, quando H for ele mesmo uma (outra) função do tempo — representada pela expressão $H = H(t)$ —, então o Universo estará em expansão (caso em que a variação $H(t)$ é positiva) ou em colapso (quando $H(t)$ for negativa). A aceleração é descrita por essa variação e representada por uma terceira função $B(t)$, que mede a intensidade da variação de $H(t)$.

Podemos fazer uma analogia com a mecânica de corpos materiais. Quando um corpo tem uma velocidade, nós representamos pela função $v(t)$. Se a velocidade não é constante, existe uma aceleração que em geral é representada pela letra $a(t)$. Quando essa função for positiva, dizemos que o corpo está acelerado; quando for negativa, ele estará desacelerado.

A aplicação simplista da ideia de que a gravitação é uma força somente atrativa levou os cosmólogos a aceitarem a proposição de que, à medida que o volume cresce, a intensidade de sua expansão deveria diminuir e mesmo reverter a expansão para uma forma de colapso. Ora, as observações estão revelando que talvez isso não ocorra, mas o contrário, isto é, o Universo parece estar em expansão acelerada.

^{*} Em homenagem a Edwin Hubble, o astrônomo que detectou esta expansão.

As equações de Einstein implicam, no cenário-padrão, que a aceleração só pode ser produzida por uma substância de propriedades bem estranhas, que possuiria uma espécie de pressão negativa em sua configuração. Chamou-se essa estranha substância de “energia escura”.

Entre as diversas propostas da caracterização dessa forma esdrúxula de energia, algumas são bem conhecidas, como o campo magnético. Nesse caso, a novidade que faria de uma estrutura tão conhecida uma “energia escura” estaria no novo modo de comportamento desse campo, em interação com a gravitação.

Astrofísica: Estudo da natureza física dos objetos celestes, sua composição, configuração e evolução dinâmica.

Astrofísica relativista: Aplicação das ideias relativistas à astrofísica, em particular da teoria da gravitação proposta na relatividade geral.

Astronomia: Estudo e observação dos planetas, estrelas e demais objetos celestes.

Buraco negro: As estrelas têm um ciclo dinâmico, elas evoluem com o tempo. Algumas podem se transformar, por colapso gravitacional, em uma configuração de campo gravitacional tão intenso que a ação da força gravitacional impede que qualquer matéria e/ou energia saia de seu interior. Como isso envolve também os fótons, a estrela se torna invisível, e sua existência só é comprovada pela força gravitacional que ela exerce a seu redor. A estrela que colapsou até exibir essas propriedades recebe o nome de buraco negro.

Buraco negro não gravitacional: Configuração que impede os fótons de saírem de uma região compacta por um mecanismo semelhante ao de um buraco negro. A distinção entre os dois se deve ao fato de que, no caso de um buraco negro não gravitacional, a força responsável por aprisionar os fótons é a eletromagnética.

Campos esdrúxulos: A forma mais simples de um campo é aquela em que ele requer uma só função para sua caracterização. Essa estrutura chama-se campo escalar. Embora existam exemplos desse campo no

interior da matéria, no território da física das partículas elementares, não há qualquer evidência observacional de que ele possa ter uma atuação no nível macroscópico, cosmológico. Entretanto, por diversas razões, a possibilidade de existência de um campo escalar de grande alcance tem sido, nos últimos anos, intensamente examinada pelos cientistas. Algumas pessoas veem nisto uma prova louvável da interação entre o micro e o macrocosmo. Outras veem somente uma desesperada hipótese capaz de salvar o modelo-padrão de uma catástrofe maior e do total aniquilamento, por sua incapacidade de produzir explicações aceitáveis para as recentes observações astronômicas. Não me parece haver contradição entre as duas posições.

Corpo negro: Cavidade fechada contendo um “gás de fótons” em equilíbrio térmico com um termostato capaz de manter o sistema a uma dada temperatura fixa.

Cosmologia: Estudo do Universo identificado a “tudo que existe”, isto é, matéria, energia, espaço e tempo. A cosmologia é uma ciência que invade praticamente todas as áreas da física e da astrofísica relativista, descrevendo tanto a geometria do espaço-tempo como a distribuição da matéria e energia existentes. Em sua versão contemporânea, ela pretende produzir uma história completa do Universo desde sua criação — distante de nós por um tempo finito ou infinito —, a partir dos estados especiais “singularidade” ou “vazio”. Sua prática constitui uma verdadeira refundação da física.

Curvatura do espaço-tempo: Medida da intensidade da força gravitacional. Na relatividade geral, matéria e energia sob qualquer forma influenciam as propriedades geométricas do espaço e do tempo. Tudo se passa como se o espaço-tempo fosse uma substância com propriedades elásticas afetadas pelos corpos materiais, produzindo sulcos e reentrâncias nessa estrutura, modificando assim o movimento dos corpos em interação. Esses sulcos são maiores ou menores conforme a intensidade do processo gravitacional.

Equação de estado: As características reais de um fluido são descritas por várias quantidades, como energia e pressão, que em geral são quantidades

independentes. Em um fluido perfeito, elas são relacionadas pelo que se chama de equação de estado. Um modelo idealizado de um fluido descreve essa relação através de uma expressão linear da forma

$$P = s E,$$

onde P é a pressão, E é a energia do fluido e s uma constante. Para os fluidos convencionais estudados em laboratórios, essa quantidade s é positiva e tem um valor máximo igual a 1.

Fluido perfeito: Os modelos cosmológicos tradicionais, em particular, o modelo de Friedmann, usam uma configuração material cuja origem na física remonta à hidrodinâmica, mais especificamente ao movimento dos fluidos. Quando esse fluido não possui viscosidade, não perde energia sob forma de fluxo de calor, ele é chamado de fluido perfeito.

Grande lambda: Constante cosmológica introduzida por Einstein em seu modelo. Pode ser interpretada em termos de um fluido perfeito. Entretanto, o valor da constante s para esse fluido é esdrúxulo, ela é negativa e igual a -1 (menos um).

Hádron: As partículas elementares são divididas em duas grandes famílias: os hádrons, que interagem pela força forte; e os léptons, que interagem via força fraca. Exemplos de hádrons são o próton e o nêutron, que desempenham importante papel na constituição dos átomos. Exemplos de léptons são o elétron e o neutrino.

Modelo cosmológico: Descrição de como dada distribuição de matéria e energia produz modificações em escalas cósmicas — isto é, em grandes dimensões de espaço e de tempo — por meio do estabelecimento de uma geometria que satisfaça as equações da relatividade geral. A força gravitacional é a principal responsável pelas propriedades globais do Universo. Na descrição da relatividade geral, seu efeito observável é modificar as propriedades geométricas do espaço e do tempo. Isso significa que as réguas com que medimos distâncias espaciais e os relógios com que medimos o tempo são alterados pela presença de matéria e energia que geram um campo gravitacional.

Multiplicidade de modelos big bang: A geometria de Friedmann admite como fonte — via equações da relatividade geral — um fluido perfeito. Essa configuração de distribuição da matéria é caracterizada, como vimos, pela densidade de energia (representada pela letra E) e pela pressão (representada pela letra P). Entre elas existe em geral uma equação de estado que relaciona as duas quantidades, a saber:

$$P = s E.$$

Assim, para cada valor possível da constante s , temos um dado tipo de fluido perfeito. Como, na maior parte dos fluidos conhecidos, s assume valores entre 0 e 1, existe uma grande quantidade de configurações materiais. Cada uma dessas configurações corresponde a uma dada geometria possuindo um correspondente big bang. Claro que somente um desses valores teria sido efetivamente realizado na natureza. Como não sabemos com precisão qual foi ele, todas as possibilidades devem ser entendidas como geometrias possíveis, isto é, possíveis universos, cada qual gerando seu correspondente big bang.

Relatividade geral: Teoria elaborada em 1915 pelo físico alemão Albert Einstein para descrever a força gravitacional, em substituição à teoria de Newton (século XVII).

Singularidade: Região do espaço-tempo onde, segundo a teoria da relatividade geral, quantidades físicas associadas ao campo gravitacional assumiriam valor infinito e se tornam inobserváveis. Em particular, o próprio campo gravitacional deixa de ser observável.

Steady state: Modelo cosmológico segundo o qual o Universo estaria em expansão uniforme. Como um rio cujas águas se movem em ritmo contínuo permanente e uniforme, de tal modo que a cada momento temos a impressão de imobilidade, o Universo apresentaria a mesma configuração, embora seu volume varie. É como se a taxa de variação do volume total do espaço fosse sempre a mesma.

Supernova: Explosão catastrófica de uma estrela capaz de ejetar boa fração de energia para o exterior, de tal forma a iluminar quase toda a galáxia em que se encontra.

Referências bibliográficas

- COTTA MELLO, Elizabeth. *Estudo sobre as cosmogonias nas civilizações antigas*. Tese de doutorado, Instituto de Psicologia, Rio de Janeiro, UFRJ, 2002.
- EINSTEIN, Albert. *El significado de la relatividad*. Buenos Aires, Espasa-Calpe, 1952.
- GRIB, Andrey. *Early Expanding Universe and Elementary Particles*. São Petersburgo, Friedmann Laboratory Publishing Ltd., 1995.
- HOYLE, Fred e Jayant V. Narlikar. *Action at a Distance in Physics and Cosmology*, San Francisco, W.H. Freeman and Co., 1974.
- HAWKING, Stephen. "The occurrence of singularities in cosmology". *Proceedings of the Royal Society*, A 300, p.187.
- NOVELLO, Mário. *Cosmos et contexte*, Paris, Masson, 1987.
- _____. *Máquina do tempo (um olhar científico)*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 2005.
- _____. *O que é cosmologia?* Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 2006.
- _____. *Os jogos da natureza*. Rio de Janeiro, Campus, 2005.
- NOVELLO, Mário e Santiago Bergliaffa. "Bouncing cosmologies", *Physics Reports*, vol.463, n.4, jul 2008.
- SANTORO, Alberto et al. *Roberto Salmeron Festschrift (a Master and a Friend)*. Rio de Janeiro, Aiafex, 2003.
- VÁRIOS AUTORES. *La naissance du monde*, Col. Sources Orientales. Paris, Éditions du Seuil, 1959.
- WEINBERG, Steven. *Les trois premières minutes de l'Univers*. Paris, Éditions du Seuil, 1978.
- WILTSHIRE, David. Palestra no "Marcel Grossmann Meeting", Paris, jul 2009, [no prelo].